

Title

修士題目

微生物燃料電池を用いた
IoT センサーネットワーク構築に関する研究

IoT Sensor Network Powered by
Sediment Microbial Fuel Cells

氏名

丹羽 壮登

目次

第 1 章 序論.....	4
1.1 要旨	4
1.2 研究背景・目的	4
第 2 章 微生物燃料電池	6
2.1 微生物.....	6
2.2 微生物燃料電池の原理	7
2.3 微生物燃料電池の構造	10
2.3.1 2 槽型微生物燃料電池.....	11
2.3.2 1 槽型（エアカソード型）微生物燃料電池.....	12
2.3.3 底泥型微生物燃料電池	14
2.4 微生物燃料電池の評価	17
2.5 微生物燃料電池と土壌の pH	19
第 3 章 IoT センサーネットワーク	21
3.1 IoT.....	21
3.2 LPWA (Low Power Area Network)	22

3.2.1 Sigfox.....	23
3.2.2 LoRaWAN.....	23
3.3 ZigBee.....	24
第 4 章 実験準備	28
4.1.1 微生物燃料電池とバッテリーレス型センサー	28
4.1.2 底泥型微生物燃料電池の作成.....	29
4.1.3 電圧自動測定装置の作成	32
4.2 パワーマネジメント回路	34
4.3 ZigBee	37
4.4 エナジハーベスティングシステム.....	38
第 5 章 実験方法と結果.....	40
5.1 底泥型微生物燃料電池の発電能力.....	40
5.2 ZigBee ネットワーク構築の実験.....	45
第 6 章 結論.....	50
6.1 考察	50
6.2 今後の課題	50

謝辭.....	52
研究業績	53
参考文献	54

第 1 章 序論

1.1 要旨

本論文は、微生物の代謝を活用した微生物燃料電池を用い、その発電電力でセンサーデバイスを駆動することにより、環境モニタリングを行うワイヤレスセンサーネットワークを構築する研究を示した論文である。そして ZigBee エンドデバイスを動かすための、微生物燃料電池を用いたエネルギーハーベスティングシステムを提案する。

ZigBee は mW 級の低消費電力で動作する IEEE802.15.4 を下位層に採用しており、ワイヤレスセンサーネットワーク向けの規格である。センサーデバイスにはバッテリー寿命があり、バッテリーの交換を必要とする。そしてバッテリーを交換する際のコストは大きく、システム運用者に大きな負荷がかかる。そこで微生物燃料電池は、従来のバッテリーからバッテリーレス化を実現するための有望な技術である。微生物燃料電池は低電圧・低電流程度の低いエネルギー供給能力しかもっていないため、センサーデバイスを直接駆動させることは不可能である。そこで回路全体のエネルギーを管理するパワーマネジメント回路を介することで、センサーデバイスを間欠駆動させる。パワーマネジメント回路は主に DC/DC コンバータと電気二重層コンデンサで構築される。微生物燃料電池から得た電力を、一旦大容量コンデンサである電気二重層コンデンサに保存する。閾値以上の電力を溜まったら、一気に DC/DC コンバータを仲介させて、センサーデバイスに渡すことで間欠駆動を実現させる。そして、パワーマネジメント回路と微生物燃料電池から成る、エネルギーハーベスティングシステムを用いて、ZigBee エンドデバイスを動作させる。ZigBee エンドデバイスが動作している期間中は、それに接続されている温度センサーの値をセンシングし、その情報を ZigBee コーディネーターに送信する。本論文ではそれを実機を用いて実験を行った。

1.2 研究背景・目的

今日まで商用・私用問わず、世界中の IoT(Internet of Things)センサー数が指数関数的に増加している。総務省が刊行した令和元年の情報通信白書によると、2020 年現在で 394 億台、2021 年には 447.0 億台ものデバイスがインターネットつなぐとされている。さらに(英)IHS Markit によると、2030 年には 2500 億を超えると言われている。IoT センサーは用途は幅広く、それ次第で必要な仕様が変わってくる。一般的には、小型・低消費電力のものを想定し、単一もしくは数個の機能を保有しているデバイスを指す。例えば農業の IoT 事例を考えるならば、育てる食物にもよるが農業主は、土壌の PH・湿度・温度や作物の健康状態を確認し、管理しなければならない。その手間を省くために、それを適宜な頻度で IoT

センサーからスマートフォンなどに通知してくれるシステムに置き換えれば、農業主の手間は省ける。なぜなら、わざわざ農地に言って自分の目で確かめる必要がなく、スマートフォンをちらっと見るだけで済む。ここでシステムが上手く動作することを前提として、他に考えなければならない問題は、屋外の気候変動に伴う IoT センサーの耐久性や、データ精度など、いくつか上げられる。今しがた農業の例をとったが、どの例においても共通している大きな問題の一つに、IoT センサーのバッテリー寿命があげられる。乾電池で 10 年持つ設計が良いと言われているが、IoT センサーの電池交換は金額的コストに大きな負荷がかかる。管理する数が多ければ多いほど、それだけ労働力コストも大きくなる。また機械が苦手な方にとっては、電池の交換でさえ大きな難関になり得る。以上のことから、従来のバッテリー型のセンサーデバイスではなく、まるでバッテリーを必要としないかのように振る舞うバッテリーレス型のセンサーデバイスが望ましい。それを実現する方法の一つに、センサーデバイスを取り巻く環境から、それを動かすために必要なエネルギーを得るエネルギーハーベスティングがある。エナジハーベスティングの代表例としては、光エネルギーを電気エネルギーに変える太陽光発電などがあるが、微生物燃料電池は微生物の代謝による化学エネルギーを電気エネルギーに変えるものである。この仕組みを有効活用することで、バッテリーレス化の実装が可能で、そして最終的には持続可能なバッテリーレス型ワイヤレスセンサーネットワークの構築もすることが可能となる。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、微生物燃料電池の詳細を述べ、第 3 章では、無線通信を担う ZigBee の概要についてまとめる。そして第 4 章で、実験に使用した実機の詳細を述べ、第 5 章で実験内容と結果を述べる。最後に、それらを踏まえた結論を述べる。

第2章 微生物燃料電池

本章では、エネルギーハーベスティングシステムの構成要素である微生物燃料電池が、どのような原理に基づいて働くかを述べる。また微生物燃料電池の構造の違いによって種類を分類分け出来る。種類が異なれば、想定される環境や目的も異なってくる。それらの違いと各メリット・デメリットを説明した後に、微生物燃料電池はエネルギー供給源として、どの程度の性能を持つかを評価する指標に関して述べる。微生物燃料電池をどのような視点で用いるかによって、評価方法が異なってくる。また理論上、どの程度の電圧を出力できるのかも、化学反応式を用いて説明する。

2.1 微生物

世の中の生物は動物・植物・微生物の3種類に分類できる。微生物燃料電池で活躍する微生物は、どんな種類でも良いというわけではない。膨大な種類の中からでも、一部の限られた微生物のみである。種を問わず、ほとんどの生命は生命活動を維持するために、電子供与体と電子受容体が必要である。生物の働きによって、電子供与体が酸化して、電子受容体が還元される。動物の場合は、有機物が電子供与体で、酸素が電子受容体に該当する。つまり食事と呼吸によって、エネルギーを獲得している。植物は光合成による太陽光のエネルギー変換と、呼吸を行うことによってエネルギーを獲得している。一方で微生物は、エネルギーの獲得方法は様々である。動物と同様に酸素や有機物をエネルギー源とする微生物もいれば、植物と同じように光合成と呼吸をすることで生きている微生物もいる。さらには、動物にも植物にも当てはまらない微生物独自の方法で、鉄のような無機物を電子供与体・電子受容体として、エネルギーを獲得する微生物も存在する。微生物燃料電池で活用する微生物の多くは、動物と同じように代謝の働きを持った微生物である。代謝とは、生命の維持のために、取り入れた有機物を分解しエネルギーを得る働きのことである。電子供与体から電子受容体に電子を移動させる働きの一つとも言い換えることも出来る。微生物の中には、この代謝を行ったときに、化学反応の過程で電子を、酸素以外の電子受容体に渡すことが出来る微生物が存在する。これは電子生産菌と呼ばれており(電流発生菌、発電菌ともいう)、この種の微生物が微生物燃料電池に利用される。

電子生産菌の起源は、1911年に酵母や大腸菌による電流生成が観測されたことから始まる。当時は電流が観測されただけで、微生物燃料電池の開発が行われ始めたのは、1980年代に入ってからである。当時までに発見された電子生産菌では、微生物燃料電池として用いるには、あまりにも低電圧・低電流であった。それに加えて、微生物燃料電池の構造・原理が現在のそれよりも複雑で、メディエータと呼ばれる、微生物燃料電池の電極(電子受容体)と電子生産菌を仲介する役割を持った電子伝達剤が別途必要だった。多くの微生物の細胞

壁は非導電性であり、直接電極に渡すことが出来なかった。メディエータは、微生物の細胞壁を通過し細胞内で電子を受け取り、それを電極に渡す役割があった。以上の理由から当時、微生物燃料電池としての利用はそれほど注目されなかった。微生物燃料電池として期待が持たれたのは 2000 年頃になってからである。1980 年代までに発見された電子生産菌と違い、メディエータを必要とせず電子を効率良く電極に、直接受け渡すことが出来る仕組みを持った電子生産菌が新たに発見された。それ故に当初と比べ、発電能力が大きく向上した。2005 年頃から、アメリカを中心に微生物燃料電池に関する研究が活発に行われるようになった。微生物燃料電池の構造を変化繰り返しながら、現在は数種類の微生物燃料電池が存在する。しかしどのタイプの微生物燃料電池であっても、使用される電子生産菌は共通している。現在の微生物燃料電池として最も広く利用されている電子生産菌は、シュワネラ菌とジオバクター菌の 2 種類である。その他にも多くの電子生産菌がこれまでに発見されているが、その 2 種類の電子生産菌は、私たちを取り巻く環境の土壌、河川や海底、廃水などありとあらゆる様々な環境中に存在することが知られている。

2.2 微生物燃料電池の原理

上述した通り、微生物燃料電池は電子生産菌の代謝を利用する。有機物に含まれる化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換する装置と言える。代謝の過程で放出された電子をアノード極で受けとり、電子はリード線を伝わってカソード極まで流れていく。具体的にはまず、アノード極で起こるプロセスは以下の手順に従う。

- ① 電子生産菌が生命活動を維持するために代謝を行う。
- ② 代謝によって有機物が分解され、電子生産菌の体内で電子が放出される
- ③ 電子受容体はその電子を受け取る。

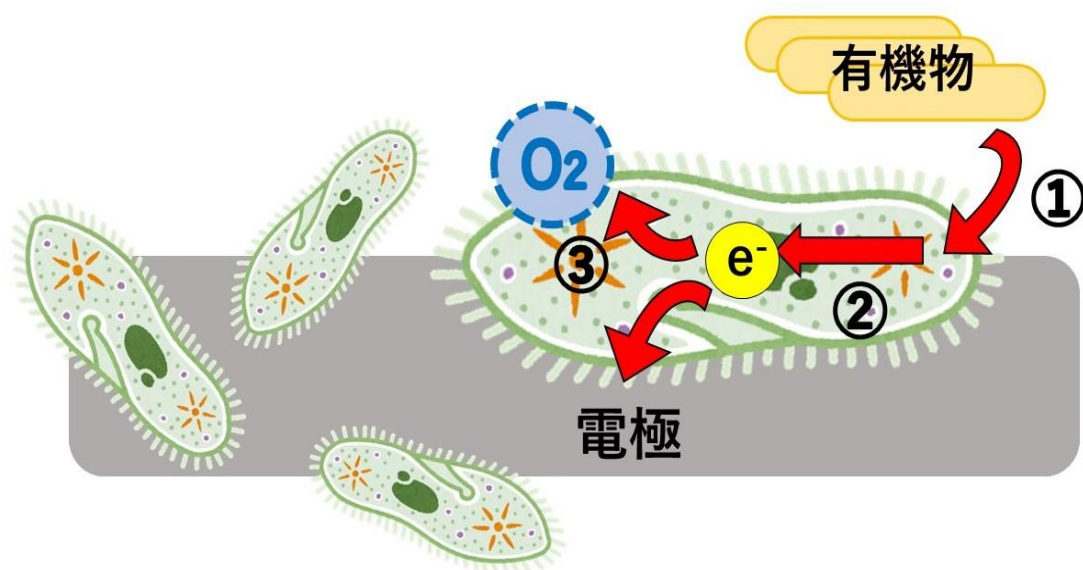
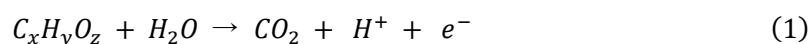


図 1. 微生物燃料電池の原理

ここで、電子受容体には酸素と電極が該当する。代謝によって放出した電子の全てが電極に渡るわけではなく、酸素に渡る場合もある。動物の代謝は酸素だけを電子受容体とするが、電流生産菌は嫌気性微生物なので、固形状の物質である電極も電子受容体とすることが出来る。もし酸素に電子が渡ってしまったら、そこで酸化還元反応が起きてしまうので、期待する発電能力は出ない。したがって、全ての電子を電極に渡せることが最も望ましい。電子を電極に渡すためには、電極周辺を酸素が無いような完全な嫌気性環境にすること必要がある。しかし実用的な問題上、完全な嫌気性環境にすることはとても難しく、酸素がある程度還元されてしまうのは避けられない。電子が電極に渡れば、そのままカソード極にまで流れていく。カソード極に流れ着いた電子は、そこでカソード極反応を起こす。電子・酸素・水の三つが還元反応して、水酸化物イオンが発生する。したがってカソード極周辺には、酸素と水が必要である。以下にアノード極とカソード極周辺で引き起こされる反応を示す。

アノード極反応



カソード極反応



$C_xH_yO_z$ は任意の有機物を示す。水中もしくは土壌中には、さまざまな種類の有機物が存在する。電子生産菌が分解できる有機物であれば、どの有機物でもアノード極反応は起こり得る。ここで注意したいのは、電極それ自体は、反応に関与しないことである。カソード反応を促進させるために、触媒を混ぜて作ったカソード電極は存在するが、どちらの電極も反応に不活性である必要がある。そして、アノード極とカソード極として用いられる電極は、全く同一のものでない場合もある。なぜならそれぞれ求められる性質が異なるからである。アノード極の場合、電気抵抗率が低いこと(内部抵抗を下げるため)、表面積が大きいこと(多くの微生物を電極に付着させるため)などが求められる。一方カソード極で求められる性質は、導電率が高いことなどが求められる。微生物燃料電池の長期運用を考慮した場合は、どちらの電極も経年劣化しない性質が必要となってくる。

多くの場合、アノード電極もカソード電極も、炭素原子で構成されるカーボン素材やグラファイト素材が使われる。それらの素材は電極に求められる性質を満たしているが、素材の選定には注意が必要である。不純物が多く含まれていたり、電気抵抗率が高くては、意味がなくなってしまう。カーボン・グラファイト素材を電極として用いる場合、十分に良い性質を満たす素材を選ぶと、価格が高騰するので良品質と設計コストはトレードオフである。炭素系素材を利用するメリットは、上記の各電極に求められる性質以外も持ち合わせている。炭素系素材は多孔質なので、微生物が付着しやすい点である。このことは、電子生産菌を含め、アノード極に付着した微生物が増殖するのに効果的である。微生物の増殖は、微生物燃料電池の発電能力を向上させる上で大きな役割を担っている。しかし、シュワネラ菌などの電子生産菌を意図的に培養して、それをアノード極の表面全域に付着させるといった行いはしない。なぜなら、そのような純粋培養系環境は人工的に作られた環境であり、自然環境のような微生物混合系の環境とは、かけ離れているからである。確かに、電子生産菌以外の微生物が共存していると、本来、電子生産菌が分解することを期待されていた有機物が、メタン生産菌など他の微生物に取られてしまう。つまり微生物の共存は、有機物の競合が発生してしまうことにつながり得る。ところが、ごく自然環境のような混合系環境では、電子生産菌と競合する微生物も存在すれば、そうでない微生物も存在する。微生物にとって、分解可能な有機物はそれぞれ異なる。ある特定の微生物だけが分解可能な有機物が微生物燃料電池内を満たしている場合、それが電子生産菌が分解可能な有機物に変換されるといったことも起こり得る。競合する微生物が存在する場合とそうでない場合を考慮した場合、特定の微生物だけが微生物燃料電池内に存在するのではなく、多種多様な微生物が共存する環境の方が、結果的には大きな発電能力を示す。つまり電子生産菌以外の微生物が、間接的に発電に関与するのである。

なお電極の形状としては、カーボンブラシ、グラファイトフェルト、グラファイトロッドなど様々なものがある。微生物燃料電池の筐体や内部構造に合わせて、それに適した形状を用いる。カーボンやグラファイト以外の他の素材としては、金属素材が用いられる。金属素材は炭素系素材と比べて、高い導電率を示す。例えば一般的にグラファイトは $1.0 \times 10^6 S/m$

の導電率を示し、鉄は $11.2 \times 10^6 \text{ S/m}$ の導電率を示す。しかし金属素材は、長期運用を考えた場合、腐食(酸化還元反応によって金属が酸化される現象)して電極として機能しなくなってしまう可能性がある。また炭素系素材と比べて金属素材は、多孔質ではないため、微生物が表面に付着しにくいというデメリットもある。表面に付着しにくいのなら、電子が電極に渡らず、電極として機能しないのではないかと思われがちである。電子生産菌の一種であるジオバクター菌は、鉄還元菌の一種でもある。鉄還元菌とは、金属である鉄を電子受容体として代謝を行っている微生物である。動植物は呼吸によって酸素を体内に取り組み、酸素を電子受容体としているが、このジオバクター菌は、海底のような酸素を必要としない嫌気性環境では、鉄を酸素代わりにして生きていることが確認されている。つまり、多孔質でない金属でも微生物燃料電池の電極としても、機能することは十分に可能である。また金属を電極として使う最大のメリットは、カーボンやグラファイト素材に比べて、低コストであり、そして微生物燃料電池の筐体に併せて、適切に形状を変化させやすい点である。

以上のことから、微生物燃料電池の原理は、以下のようにまとめることが出来る。電子生産菌が代謝をすることで、アノード極反応が起こり、電子がカソード極まで運ばれることで、カソード極反応が起こる。

2.3 微生物燃料電池の構造

微生物燃料電池は構造によって、いくつかのタイプに分けることが出来る。大きく分けて以下の3つの典型的タイプが存在する。

- ① 2槽型微生物燃料電池
- ② 1槽型(エアカソード型)微生物燃料電池
- ③ 底泥型微生物燃料電池

どのタイプの微生物燃料電池であっても、その原理は変わらず、電極で起こる反応も同じである。どのような素材を使うか、どのような構造になっているかによって違いが生じる。また構造が異なるため、適用される環境や使用目的も異なる。以下に各タイプの違いについて述べる。

2.3.1 2 槽型微生物燃料電池

微生物燃料電池が初めて発明されたタイプである。名前にある通り、アノード極とカソード極がそれぞれ槽として分離されている。その構造を以下に示す。

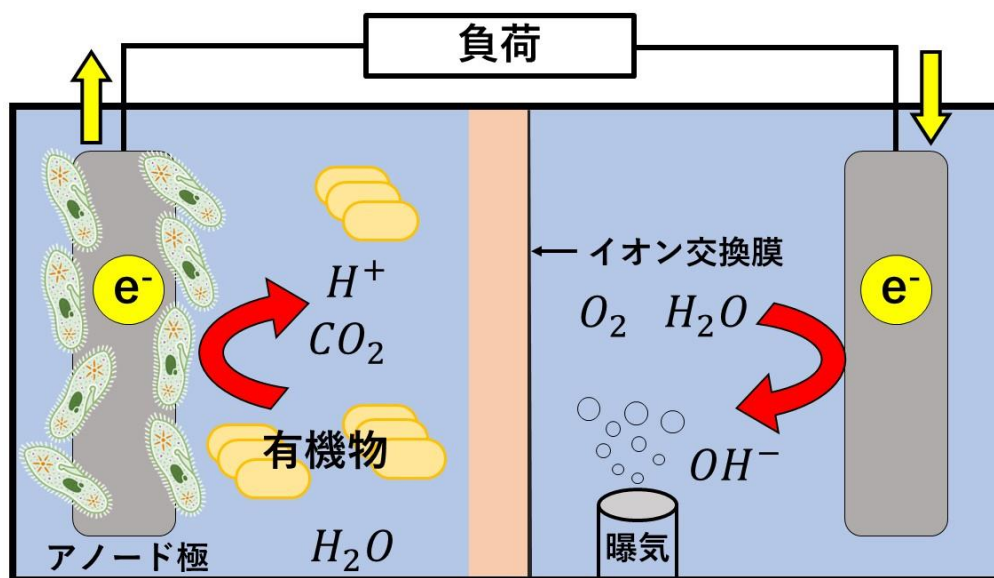
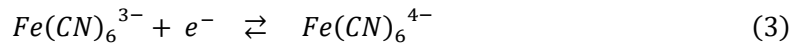


図 2. 2 槽型微生物燃料電池

2 槽型微生物燃料電池の特徴は、イオン交換膜と曝気装置が基本的に必要な点である。アノード槽もカソード槽も槽として閉じた空間なので、カソード極反応に必要な酸素が不足する。そこで、曝気装置を用いて外部から内部へ、十分な量の酸素を供給する必要がある。またイオン交換膜に関しては、アノード槽とカソード槽を 2 槽に仕切る。そして、アノード極反応で発生した水素イオンのみをカソード槽へ移動させる役割を担っている。またイオン交換膜ではなく、塩橋を用いることで、カソード槽とアノード槽を物理的に離す構造もある。カソード極反応では、電子、水、酸素を反応物としているが、電子生産菌は嫌気性微生物なので、酸素以外を電子受容体とすることが可能である。例えば $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ （フェリシアン化物イオン）を電子受容体に用いた場合は、カソード槽において酸素は必要なくなる。この場合のカソード極で起こる化学反応式を以下に示す。アノード極反応は、式(1)と同じである。

カソード極反応



このように酸素以外の物質を電子受容体として、カソード極反応に用いることが可能である。フェリシアン化物イオンを用いる場合、酸素を用いる場合よりもカソード極での過電圧（電極電位差の理論値と実際値の差）が低くなるため、発電能力を向上させることが出来る。しかしフェリシアン化物イオンの毒性が強い。微生物燃料電池の運用中にイオン交換膜にトラブルが起きた場合、注意が必要である。その影響でフェリシアン化物イオンを含んだ溶液が、カソード槽からアノード槽に流れてしまうと、アノード槽に存在する微生物が死滅してしまう。したがって、その危険があるため、基本的には酸素をカソード極反応に用いる。

この 2 槽型微生物燃料電池は、人工廃水等の浄水目的で使用されることが多い。廃水には、多種多様な微生物と豊富な有機物が存在する。発電とは別に、微生物の代謝に焦点を当て、廃水中の有機物を分解することで、それらを除去することを目的としている。現在の廃水処理における主要な処理方法は、この微生物燃料電池以外に、従来からの方法である、活性汚泥法やメタン発酵法がある。いずれの方法もメリットとデメリットが存在する。微生物燃料電池はその原理上、他の 2 種の方法に比べて、装置全体の消費エネルギーは少ないにも関わらず、処理速度や処理水質が比較的高いの特徴である。ここでいう処理水質が高いとは、高濃度から低濃度の幅広い濃度の廃水や多種の有機物が含まれてる廃水に対応可能である、ということの意味する。なお従来の活性汚泥法の方が、処理速度や処理品質は微生物燃料電池はよりも高いが、活性汚泥法によって増殖した微生物の処理に多くのエネルギーが必要となる。メタン発酵は、廃水中のエネルギーをメタンガスとして、回収する技術である。メタンガスを取り扱うため爆発の危険、有毒ガスの硫化水素の発生、小規模処理に向かないなどの短所がいくつかある。しかしメタン発酵には、活性汚泥法より、装置全体の消費エネルギーが低い長所がある。

2.3.2 1 槽型（エアカソード型）微生物燃料電池

上記の 2 槽型微生物燃料電池とは異なり、1 槽で構成されている微生物燃料電池である。2 槽型と大きく違うのは、曝気装置を必要としない点である。曝気装置は、外部から微生物燃料電池内部へ酸素を送るエネルギーが必要であり、さらに酸素の水への溶解度は、 10mg/L 程度と低く、装置の効率が悪い。そこで、カソード極で、空気中の酸素を直接利用出来る、エアカソード極が発明された。そのためエアカソード型微生物燃料電池とも呼ばれる。酸素はカソード極と空気の境界を通して、装置内部へと通過してくる。このエアカ

ソードによって、曝気装置が不要な上、空気中の酸素をカソード極反応に使用することが出来るため、酸素供給効率が向上する。発電能力は、1 槽型微生物燃料電池の方が、2 槽型微生物燃料電池よりも高い。また、このエアカソード型微生物燃料電池の発明によって、微生物燃料電池の研究に大きな関心が寄せられるようになった。ここで 1 槽型微生物燃料電池の構造を、以下に示す。

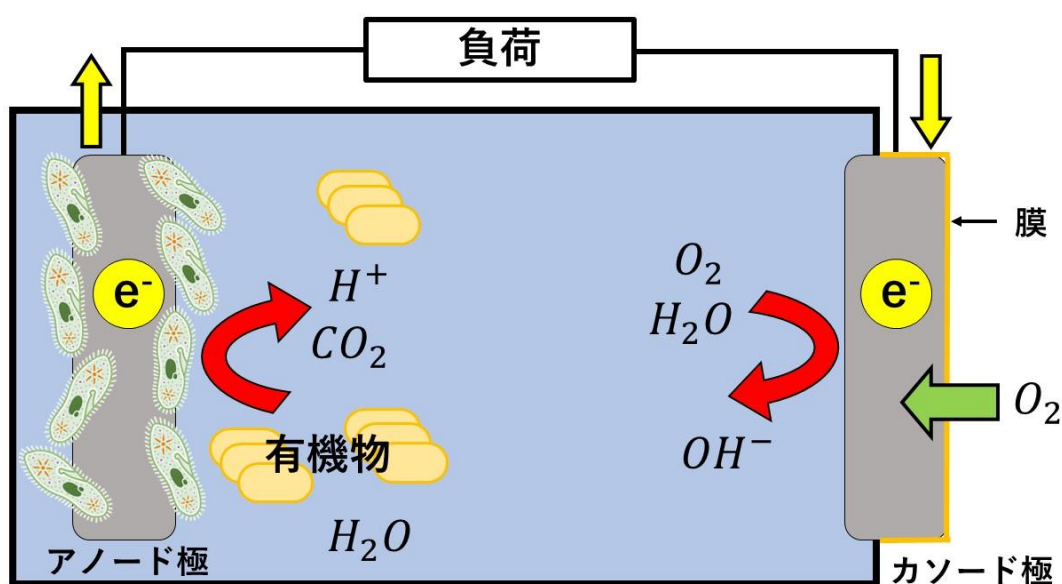


図 3. 1 槽型微生物燃料電池

1 槽で構成されているため、水素イオンだけを通すことが出来る、イオン交換膜や塩橋といった特別な仕切りは必要ない。しかしアノード極への酸素到達の影響が大きい装置にとっては、カソード極と空気の境界線に膜を張る場合もある。この膜は微生物燃料電池の内部に、酸素が過度に混入することを軽減させる目的がある。酸素が内部に混入した場合、アノード極反応とカソード極反応がほとんど同時に、アノード極で起こり得ることになる。電子生産菌は代謝をして、アノード極に電子を渡す。しかし、アノード極周辺に酸素が存在すると、そのままアノード極でカソード極反応が起きてしまう。これでは発電能力が下がってしまう。2 槽型微生物燃料電池で用いる膜とは別の目的で、1 槽型微生物燃料電池では用いることがある。1 槽型で用いられる膜の種類には、プロトン交換膜や逆浸透膜などがある。アノード極への酸素到達度合いが低い場合は、膜を用いる必要はない。

2 槽型のイオン交換膜のような仕切りは、各電極の反応物や生成物が、他方の電極槽に移動することを物理的に防ぐ役割を持つ。1 槽型微生物燃料電池の構造は、2 槽微生物燃料電

池よりも発電能力は向上するが、仕切りを使わないことによる利用制限を被ることになる。2槽で構成されている場合は、アノード槽とカソード槽を距離を置いて設置することが可能であるが、1槽の場合はそれが不可能になる。このことは、微生物燃料電池の物理的な設置時に問題になる場合がある。また2槽型はカソード極の電子受容体は、酸素以外の場合においても適用可能だが、1槽型微生物燃料電池では酸素のみだけである。しかし1槽型であろうと2槽型であろうと、多くの場合は廃水処理を目的として実用化されるため、カソード極では酸素を用いられることが多い。

2.3.3 底泥型微生物燃料電池

上記の1槽型もしくは2槽型微生物燃料電池は、主に廃水等の水中に微生物と有機物が存在することを前提にしていた。一方で底泥型微生物燃料電池は、土壤中に存在する微生物と有機物を利用する。電子生産菌は、地球環境上のあらゆる場所に存在することが知られているが、土壌によって、微生物と有機物の種類やその濃度が異なる。底泥型微生物燃料電池で用いる土壌は、森、湿地帯、海底、庭など、基本的にはどこの土でも発電可能である。しかし、黒く汚くて臭いが悪い土壌の方が良い発電能力を示す、と言われている。バッテリーレス型IoTセンサーへの適用を考慮した場合、槽型微生物燃料電池の方よりも、底泥型微生物燃料電池の方が水陸問わず適用出来るので、その適用性は高い。したがって、本論文ではバッテリーレス型IoTセンサーへの適用にあたり、底泥型微生物燃料電池を用いる。

なお底泥型微生物燃料電池の構造は、1槽(エアカソード)型に似ている。カソード極側から内部へ酸素を供給する。一方、アノード極は容器(地中)の奥深くに埋める。アノード極を奥深くに埋めることによって、カソード極側から通過してくる酸素と反応する軽減させる目的がある。以下にその構造を示す。

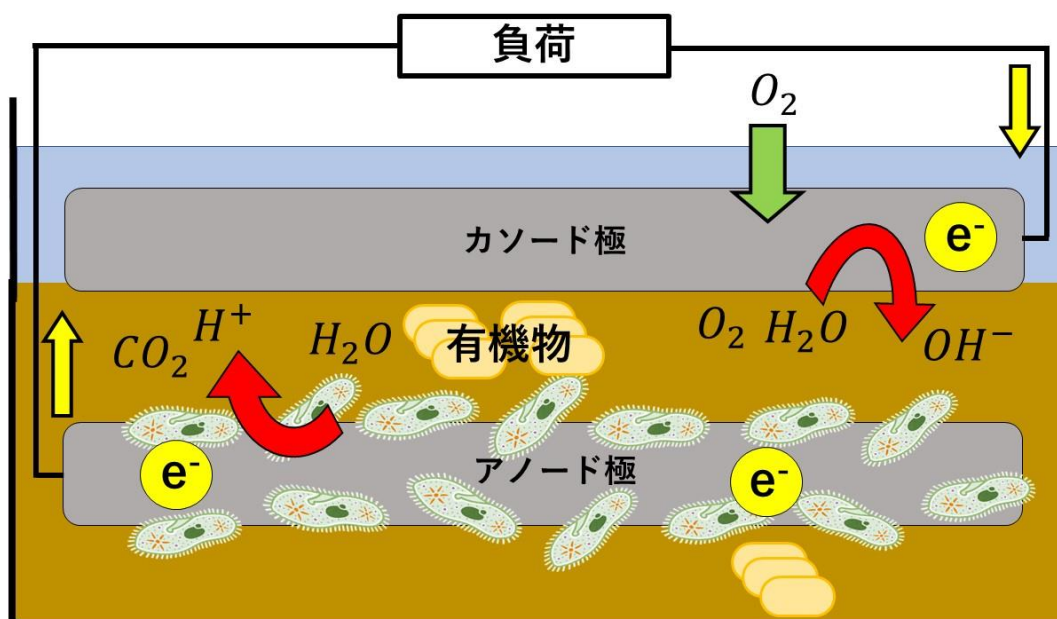


図 4. 底泥型微生物燃料電池

底泥型微生物燃料電池では、各電極の反応物として用いる H_2O （水分子）の使用量に注意が必要である。反応物として使用した水分子は、アノード極反応とカソード極反応によって、ある程度の量は取り戻せるようになっている。アノード極反応で発生した水素イオンと、カソード極反応で発生した水酸化物イオンが反応し、水分子が発生する。以下にその化学反応式を示す。



もし水分子が不足すると、アノード極反応、カソード極反応ともに反応速度が遅くなり、発電能力が落ちる。底泥型微生物燃料電池を用いる環境や目的によっては、そういった事態が発生する。その場合は底泥型微生物燃料電池作成時に、予め土壌を湿らせておいたり、土壌の上に水が堆積するようにする。このようにして、土壌に十分な水分を含ませるための対策をとる。ここで、水を土壌に堆積しすぎてしまった場合について述べる。水の過度な追加は、空気中の酸素がカソード極への到達を軽減させることになるので、カソード極反応に必要な酸素が不足する羽目になる。その結果、逆に発電能力を下げることにつながる。したがって、意図的に水を加える際には、適切な量を加える必要がある。

また底泥型微生物燃料電池に植物を用いて、植物型微生物燃料電池という種類の微生物燃料電池も存在する。その構造を以下に示す。

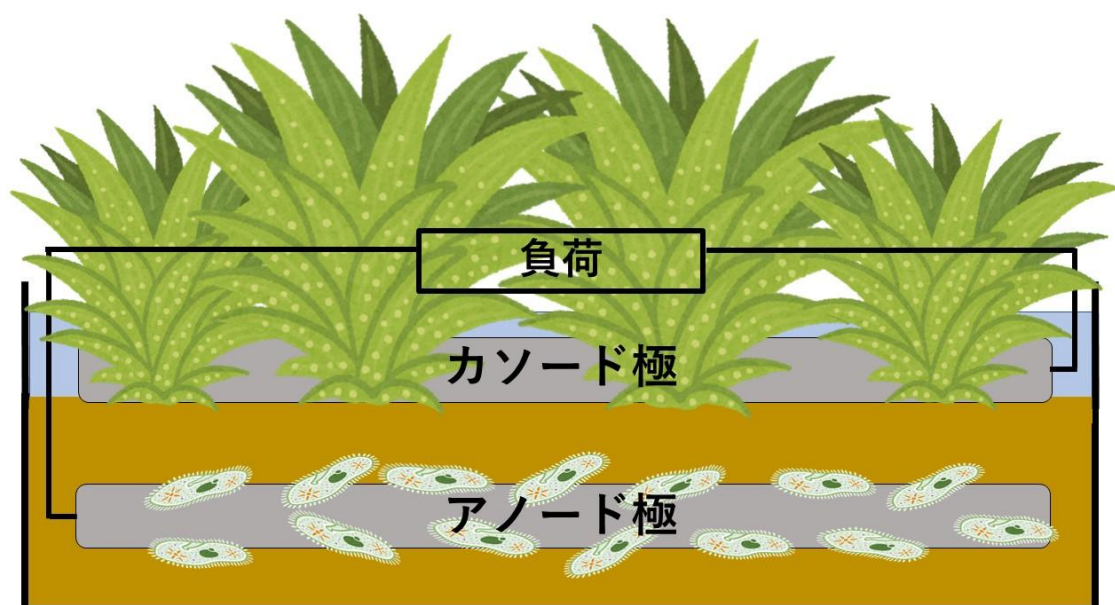
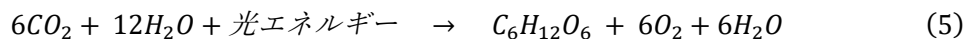


図 5. 植物型微生物燃料電池

これは土壤に植物を埋め、その植物の光合成を有効利用するタイプである。ここで植物の光合成は、以下の化学反応式で表現できる。

光合成



植物が光合成を行うと、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ （グルコース）を排出する。これは植物の栄養分として植物体内に取り込まれるが、その余剰分が根を通して土壤中へ排出される。つまり植物は、土壤中に有機物を供給する役割を持つ。底泥型微生物燃料電池に適用できる植物は、種類が限られており、どんな種類の植物でも上手く機能するというわけではない。有機物を常に供給できるメリットはあるが、微生物燃料電池の発電能力は植物の生命力と、周辺環境の影響を

大きく受ける。太陽光が植物に当たる環境や、通年生命力を保てる植物でないと、持続可能性はなくなる。つまりバッテリーレス型 IoT センサーとしての有用性は軽減する。

2.4 微生物燃料電池の評価

微生物燃料電池の性能について述べる。微生物燃料電池の最大電圧の理論値は、アノード極反応とカソード極反応によって決まる。以下の表に、各電極における反応が起きたときの標準電極電位を記す。

表 1. 微生物燃料電池の理論最大電圧

	電位 (V vs. SHE)	条件
$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.229	標準状態($pO_2 = 1, pH = 0$)
	+0.805	$pO_2 = 0.2, pH = 7$
	+0.627	$pO_2 = 0.2, pH = 10$
$MnO_2(S) + 4H^+ + 2e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	+0.47	$[Mn^{2+}] = 5mM, pH = 7$
$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	+0.361	$[Fe(CN)_6^{3-}] = [Fe(CN)_6^{4-}]$
$CH_3COO^- + 4H_2O \rightleftharpoons 2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^-$	-0.296	$[HCO_3^-] = 5mM, pH = 7, [CH_3COO^-] = 5mM$
$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightleftharpoons 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$	-0.428	$pH = 7$

Logan, B.E. 2008. Microbial Fuel Cells. John Wiley & Sons, p31

M は、モル濃度(mol/dm^3)を示す。 pO_2 は、大気中の酸素分圧(atm)を示す。また V vs. SHE(Standard Hydrogen Electrode)は、標準電極電位を示す。標準電極電位とは、標準状態($25^\circ C, 1atm$ で反応物および生成物の活量が 1 のとき)における電極の基準電位のことである。

ここで例えば、アノード極反応は式(1)、カソード極反応は式(2)の化学反応が起こったとする。条件は、 $pO_2 = 0.2, pH = 7$ 、そして分解される有機物は光合成によって排出される $C_6H_{12}O_6$ とする。この時の微生物燃料電池の最大電圧の理論値は、 $+0.805 - (-0.428) = +1.233V$ になる。しかし微生物燃料電池は、内部抵抗が化学電池と比べて、はるかに高い

め、実際にこの電圧を計測することは困難である。内部抵抗は、電極の条件や微生物燃料電池が置かれている温度などの周辺環境の影響を受ける。またこの理論最大電圧は、瞬間的な値にすぎないことに注意したい。ある任意の値の電圧を常に出力できるかは、別の問題になる。任意の電圧を常に出し続けるには、アノード極反応とカソード極反応の発生が相応の頻度と速度で行われなければならない。作成した微生物燃料電池によって、それらは異なってくる。

次に微生物燃料電池の評価方法について述べる。評価方法はいくつか存在する。何を評価対象にするかでその方法も異なる。評価方法は主に、以下のものがある。

- ① COD 除去率
- ② クーロン効率
- ③ 電力密度曲線

上記 2 つの評価方法は、微生物燃料電池で有機物を、分解することを目的としたときに用いられる。電気密度曲線は、微生物燃料電池の発電能力についての指標である。以下に、COD 除去率とクーロン効率について簡単に述べる。なお本論文で用いた評価方法の一つである③電力密度曲線に関しては、他の章で実験結果と共に述べる。

①の COD (Chemical Oxygen Demand) 除去率とは、微生物燃料電池での有機物除去能力を示す。この指標は、発電能力が高ければ有機物除去率も高い、というわけではないことに注意したい。なぜなら電子生産菌を含めた、微生物燃料電池内部にいる他の微生物も、有機物を分解するからである。どの微生物が有機物を分解しようとも、微生物燃料電池内に有機物除去能力は向上する。この COD 除去率は、もともと廃水等に含まれる有機物の濃度にも影響する。

②のクーロン効率は、微生物燃料電池によって消費された有機物の内、どの程度の量が電子の生産に使用されたかを示す。①の COD 除去率は、分解された有機物が電子の生産にどの程度関係したかは、数値に表れない。電子生産菌が分解した有機物は、電子の生産に直接関係する。しかし、他の微生物が分解した有機物は、電子生産菌が分解できる有機物に変換する場合がある。その場合、その微生物は電子の生産に間接的に関係する。クーロン効率は、そのようなことまで考慮に入れた指標になる。したがって、COD 除去率は高くても、クーロン効率は低い場合もある。つまり廃水処理能力は高いが、発電能力としては期待できないことになる。用いる廃水の種類によっては、発電量も多くなる廃水も存在する。有機物濃度が高く、塩濃度が高く、そして緩衝能力が高い廃水が高い発電能力を示すことが知られている。緩衝能力は、アノードで生成した酸やカソードで生成したアルカリの影響を軽減できる性能のことである。つまり中性に近づける能力である。表 1 から分かる通り、同じ反応式

でも中性環境の方が大きな標準電極電位を示す。なおクローン効率と COD 除去率は併用して評価されることが多い。

2.5 微生物燃料電池と土壌の pH

微生物燃料電池の発電能力は、表 1 より pH の影響を受けることが分かる。具体的には、カソード極反応： $O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$ は、 $pH7$ とき+0.805で、 $pH10$ とき+0.627で、標準電極電位が異なる。つまり pH によって、最大出力電圧が違ってくことを意味する。本論分の主軸となる実験と異なるが、pH による影響による追従実験を行ったので、その結果を以下に示す。

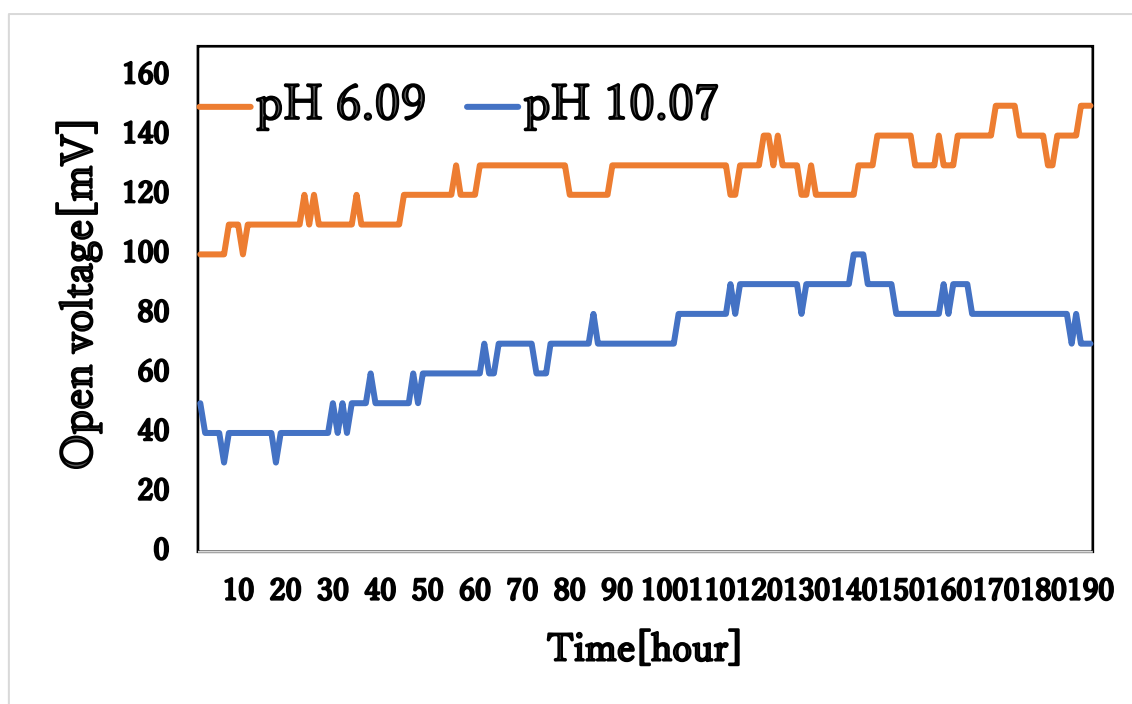


図 6. 微生物燃料電池の pH による影響

当実験は、使用した土壌は異なるが、「4.1.2 底泥型微生物燃料電池の作成」に基づいて作成した、底泥型微生物燃料電池を用いて行った。底泥型微生物燃料電池なので、水中の pH ではなく、土壌の pH である。ここで注意したいのは、土壌の pH を測定場所によって異なる、つまり pH の値は前後し、正確性に多少欠けるということである。橙色を示す $pH6.09$ は、採

取した土壌の素の pH であり、青色を示す $pH10.07$ は、素の土壌に $NaOH$ (水酸化ナトリウム) を 30mg 混ぜた合わせた土壌である。測定は、オープン電圧の推移を約 8 日間測定した。図 6 より、 $pH6.09$ のときの最大出力電圧は 150mV で、 $pH10.07$ のときの最大出力電圧は 70mV であった。このことから分かるように、土壌の pH は最大出力電圧に影響を与えることが分かる。このような pH が与える影響は、微生物の生命活動によるものだと考えられる。微生物によって、最適生育値、酸性生育限界値、アルカリ生育限界値がそれぞれ異なる。一般的に $pH7\sim8$ の値が、最適生育値とする微生物が多い。最適な pH 環境から外れると、微生物の増殖が抑えられる。つまりそのことによって、十分な電子が電極に渡らず、最大出力電圧に違いが出るのだと考えられる。

第3章 IoT センサーネットワーク

この章ではまず初めに、IoT とは何か、その概要について説明する。その後、IoT を実現するためのプロトコルに触れる。その中でもまずは、複数のプロトコルの総称である LPWA の特徴といくつかピックアップして述べる。なお LPWA の代表規格として、Sigfox と LoRaWAN の2つの規格の特徴を述べる。そして最後に、本論文で用いた ZigBee 規格に関して述べる。

3.1 IoT

IoT(Internet of Things)とは、モノがインターネットにつながることや、そのモノ自体のネットワークのことをいう。IoT のコア技術はワイヤレスセンサーネットワークであり、ここに AI などの技術も含めた総称であり、曖昧な定義でしばし用いられる。モノにはセンサーやアクチュエータが接続され、インターネットにつながることで、ユーザに利便性をもたらす。もしくはセンサーやアクチュエータ単体で用いられる。いずれせよ、センサーが取得した情報をインターネットを介すことで、柔軟に扱うことが出来るようになる。データベースに蓄積して、それを解析することで、ユーザの役に立つ情報をフィードバックさせたりすることが出来る。センサーが取得した情報をインターネットを介して、アクチュエータにフィードバックすることで、様々な機器を適切に制御することが出来る。

IoT に用いられるセンサーは、小型で基本的にはバッテリー駆動で用いることが多い。それ故に、いかに低消費電力で駆動するかが重要な要素の一つである。どのように IoT センサーネットワークを運用するかによって、最初のデータ収集所となるデータシンクは、AC 電源かバッテリーかは変わってくる。どの場合であっても IoT センサネットワークの末端となるセンサーは、バッテリーが用いられる。なおセンサーとインターネットの仲介するノードは、ゲートウェイと呼ばれ、IoT に使われる規格によって、それに該当するものが異なる。NB-IoT などのライセンス系 IoT 規格を用いると、通信事業者の基地局をゲートウェイに使う。LoRaWAN などのアンライセンス系は、ユーザ自身がゲートウェイを設置するか、そういった業者が設置したゲートウェイに参加することになる。IoT の使用方法や目的は無限に近く、アイデア次第であり、それに求められる IoT の要件も異なってくる。例えば、デバイスの耐久性、通信遅延、ネットワークトポロジーやワンホップの通信距離などがあげられる。よって IoT 向けの規格は様々なものが存在する。以下に、IoT 向け以外の規格も含め、各種通信規格の関係を示す。

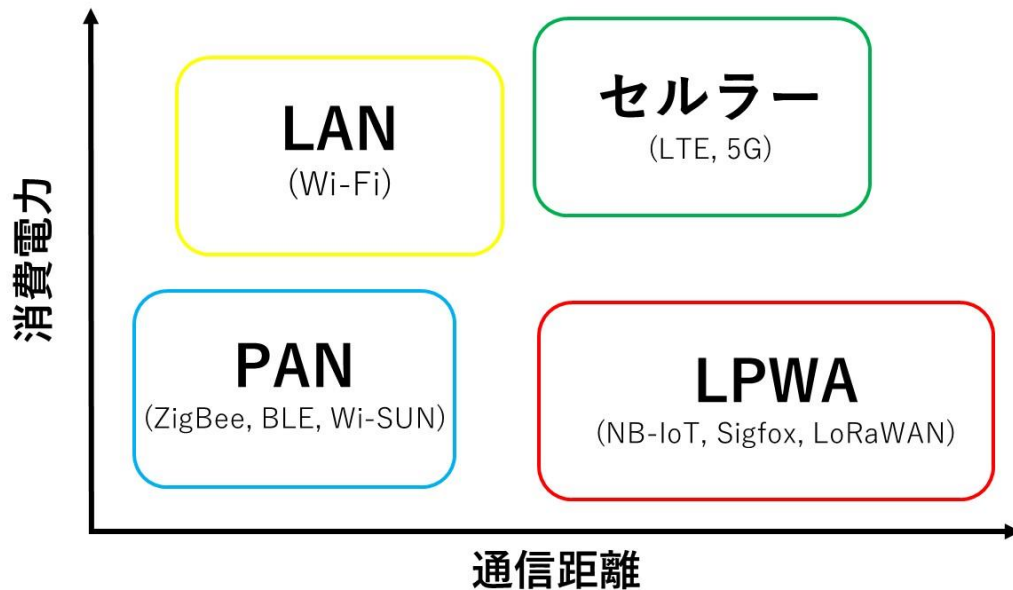


図 7 様々な通信規格

IoT にはしばし、PAN(Personal Area Network)を代表する ZigBee や Wi-SUN、そして NB-IoT や LoRaWAN などの LPWA(Low Power Wide Area)が採用される。本論文では ZigBee を用いたが、ZigBee の説明をする前に、LPWA に関して以下に述べる。

3.2 LPWA (Low Power Area Network)

LPWA は低消費電力、長距離通信を特徴とする規格の総称である。LPWA は、LTE などのセルラー通信規格を低消費電力にしたようなイメージである。IoT センサーネットワークは、動画や画像といったエンタメコンテンツや音声などといった大容量データは扱わない。したがって、周波数帯域や通信速度は低くし、その代わりに低消費電力で駆動し、ハードウェア部が低コストであることが望ましい。またセルラー通信は高い人口カバー率を誇るが、IoT センサーネットワークは、無人口地帯に展開される想定も十分に考えられ、1km 以上の長距離通信も可能であることが望ましい。LPWA は上述した特徴を満たしている。さらに様々な規格が存在し、今現在も開発されている。LPWA の規格をセンサーに採用するのに、ライセンスが必要な規格と、そうでない規格の大きく 2 種類に分類分けをすることが出来る。ライセンスが必要な規格としては、NB-IoT(LTE Cat.NB1)、eMTC(LTE Cat.M1)などがある。現存する LTE バンドの一部を使用するため、こういった規格は既に、バックボーンネットワークが整っている通信事業者が有利である。一方で、ライセンスが必要でない規

格として、Sigfox、LoRaWAN などがある。LPWA に属するとは一概に言えないもののアンライセンスの IoT 向け規格としては、Wi-SUN、Wi-Fi HaLow、EnOcean Long Range、IEEE802.15.4k などが存在する。アンライセンス系の IoT 向けの規格は、LoRaWAN や Wi-SUN などのようにサブギガ帯域である 920MHz 帯を使用する規格が多い。920MHz 帯は、Wi-Fi に代表される 2.4GHz 帯と干渉しない、障害物があっても回折する、距離減衰が比較的小さいといった優れた特徴がある。以下に LPWA の代表例として、Sigfox と LoRaWAN についての概要を述べる。

3.2.1 Sigfox

Sigfox はアンライセンス系 LPWA を代表する規格の一つで、低消費電力に加え、10km 以上の通信が可能です。920MHz 帯を用いて 100bps の通信速度を行うため、極軽量のデータを扱うことが想定されている。1 回の送信当たり最大 12 バイトで、一日最大 140 回までアップリンクが可能である。データを送信する際に、必ず同じデータを 3 回続けて、使用周波数を変更しながら送信する仕様になっている。送信された 3 つのデータは、受信可能な基地局すべてで受信する。さらに 100Hz の超狭帯域で、1 チャンネルあたり 200Hz 幅でアップリンクを行うのも特徴の一つである。そして、スペックを抑えることで、送信時の消費電力が約 20mW という、IoT に重要な要素である消費電力の低さを手に入れている。一方でダウンリンクは、アップリンクの際に併せて、要求(CallBack)することでダウンリンクが可能となる。なおダウンリンクは、最大で 8 バイトとなっている。次に、Sigfox と同程度の LPWA 代表規格をなす LoRaWAN について述べる。

3.2.2 LoRaWAN

LoRaWAN は、サブギガ帯域の 920MHz 帯を用い、Sigfox 同様に通信距離が最大で 10km を可能とする LPWA を代表する規格の一つである。物理層には LoRa(Long Range)という独自の変調方式を用いている。この方式は、シャープ拡散変調(CSS: Chirp Spread Spectrum)の派生で、受信感度、耐妨害波性能を最適化することが可能である。特定小電力無線でよく用いられる FSK(Frequency Shift Keying)変調方式よりも、数倍以上の通信距離が実現できる。なお、LoRaWAN では物理層に LoRa 変調に加えて、FSK 変調にも対応している。一方でビットレートは低いため、音声や動画等のデータ量が多い、リアルタイム通信には不向きである。比較的データ量が低い、環境モニタリングや SUN(Smart meter Utility Networks)などの実現に向いています。現在では既に業者が LoRaWAN ネットワークを構築し、商用サービスが開始している。ところが LoRaWAN の特徴の一つとして、ユーザ自らが

LoRaWAN ネットワークを構築することも可能である。その場合は、末端ノードとなる LoRaWAN デバイス、末端とバックボーンの仲介をなす LoRaWAN ゲートウェイ、そして LoRaWAN サーバなどが必要になる。したがって実際に使うには、業者に申し込むか、自前のゲートウェイをインターネットに接続しておく。LoRaWAN の特徴として、MAC 層に仕様に目的の異なる Class が 3 種類存在する。ClassA と ClassB は、電池からの電源供給を前提として、間欠駆動型を目的としたものである。ClassC は、商用(AC)電源による電源供給を前提としている。ClassA と ClassB の違いは、アップリンクかダウンリンク、どちらに向いているかの違いである。具体的には ClassA では、デバイスが任意のタイミングで、ゲートウェイに向けて送信することを許可している。デバイスは送信後瞬く間に、消費電力削減のために、スリープモードに切り替わるが、1 秒後もしくは 2 秒後にすぐに受信モードに戻る。受信可能時間はあらかじめ決められており、この期間のみゲートウェイ側からの受信が可能である。ダウンリンクで使われる ClassB では、ClassA の実装に加えて、ビーコンによって時間基準同期を定期的に行う。ビーコンによって定期的な時間基準同期をすることで、タイムスロットを調整する。スケジューリングされた該当するタイムスロット期間に、ゲートウェイ側から通信を開始することが可能である。ClassA のみ実装した場合は、ゲートウェイ起点での通信が出来ない。つまり双方向通信を実現した Class である。一方で ClassC は、商用電源での動作を想定しているので、常に送信、受信可能状態である。

3.3 ZigBee

ZigBee は、低消費電力、低データ伝送速度のワイヤレスセンサー向けの規格で ZigBee Alliance によって標準化されている。消費電力は mW 程度で、他の IEEE802.15.1 などに代表される Bluetooth や IEEE802.11 の Wi-Fi などの規格と比べて、バッテリーの寿命が長い。また ZigBee を使用する国によって異なる周波数が割り当てられている。日本を含め、世界中どの国でも 2.4GHz 帯での使用を認められている。国によって異なるが、868MHz 帯（欧州）や 915MHz 帯（北南米）での使用も可能である。最大データ伝送速度と変調方式は使用する周波数帯によって異なり、868MHz 帯では 20kbps (BPSK)、915MHz 帯では 40kbps (BPSK)、2.4GHz 帯では 250kbps (O-QPSK) である。なお厳密には、ZigBee プロトコルスタックは、OSI 参照モデルで言うところのネットワーク層以上を規定しているだけである。実際的な無線通信を行う物理層とワンホップ通信のアクセス方式等を定める MAC 層は、IEEE802.15.4 プロトコルを採用している。以下に ZigBee と IEEE802.15.4 との関係を示す。

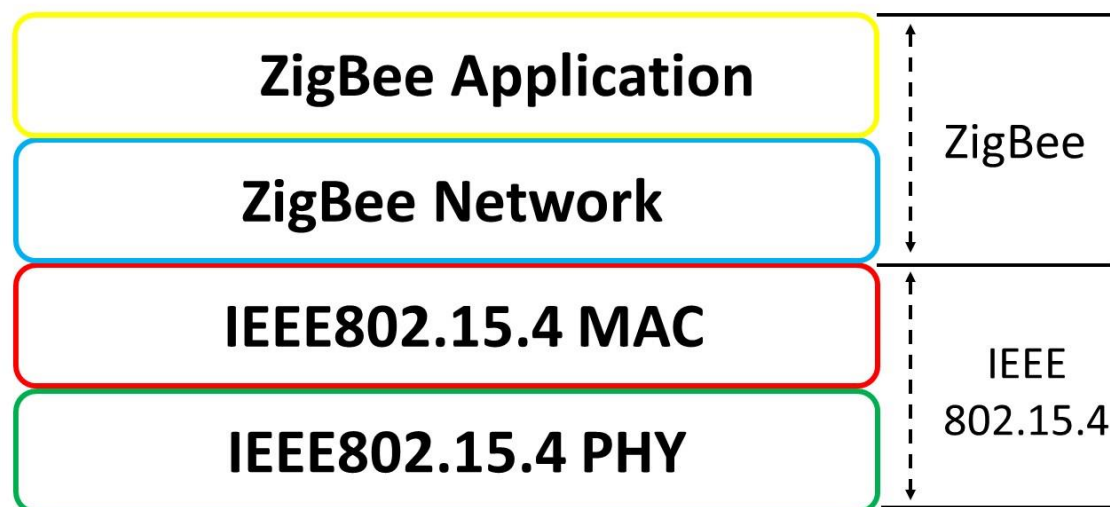


図 8. IEEE802.15.4 / ZigBee プロトコルスタック

このように ZigBee と IEEE802.15.4 の規格と上位層と下位層の関係で強く結びついている。したがって、ZigBee が低消費電力、低データ伝送速度などと言われるのは、IEEE802.15.4 のおかであることに注意したい。もちろんネットワーク層以上の振る舞いもワイヤレスセンサー向けで、例えば相互接続性があり、多数のネットワークトポロジを構築することが可能である。以下のネットワークトポロジを構成することが出来る。

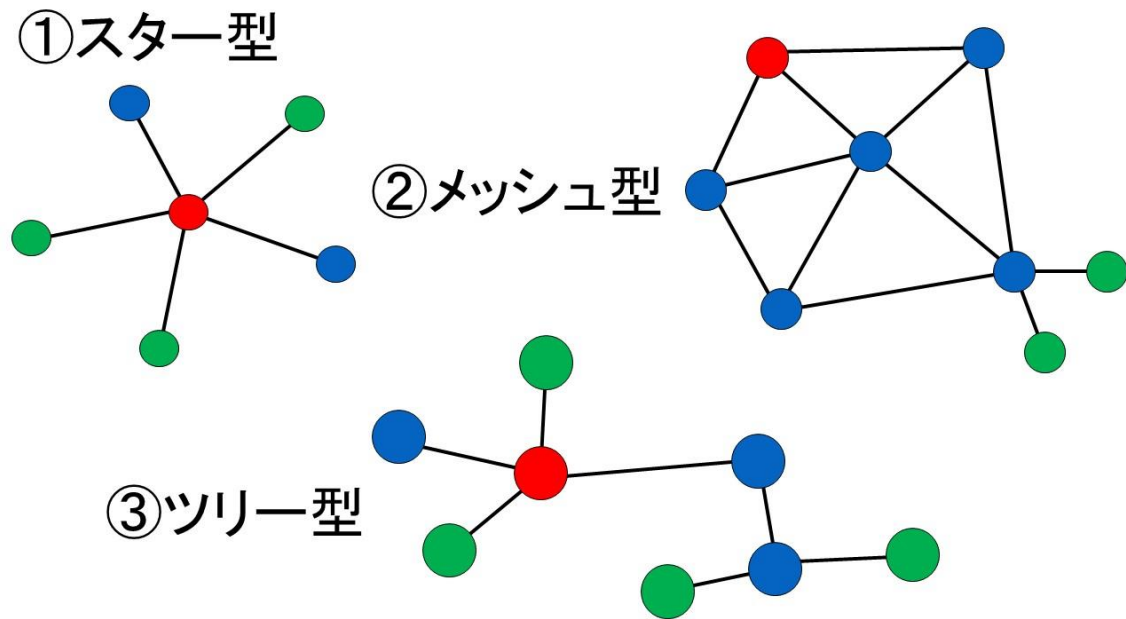


図 9. ネットワークトポロジー

上記の画像中で、一つのノードが○を示す。○の色が分かれているのは、各 ZigBee センサーで役割が異なるからである。

赤：ZigBee コーディネーター

青：ZigBee ルーター

緑：ZigBee エンドデバイス

これは ZigBee ネットワークの特徴でもある。ZigBee ネットワークは、必ず 3 種類のいずれかの役割を持つ。

ZigBee コーディネーターはネットワーク全体のデータを集約するところである。ネットワーク全体の管理者で、ネットワーク階層の最上位層に位置する。それゆえに ZigBee コーディネーターは、スリープ状態に入ることを許されておらず、常に起きている状態で動作させなければならない。またイーサネットやシリアル通信等でパソコンと接続されており、インターネットとのゲートウェイを担う。他の ZigBee ノードよりも消費電力は比較的大きいため、パソコンや AC アダプター等から給電しつつ動作させる。なお ZigBee コーディネーターがそのネットワークを立ち上げるため、ZigBee コーディネーターは各ネットワークに

1 台のみである。ハードウェアの部分は、他の ZigBee の役割よりも大きい RAM 容量など、要求されるスペックは高くなる。

ZigBee ルータは、末端の ZigBee エンドデバイスから ZigBee コーディネーターに向けてデータを中継する役割を持つ。中継地点であるため、適切なルート決定を行いながらデータ送信する。ちなみに ZigBee では AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)がルーティングプロトコルに使用されている。AODV は、リアクティブ型のルーティングプロトコルで、次のノードに送信が必要になった段階で、ルート探索を行う。プロアクティブ型のルーティングプロトコルではないため、経路情報は各ノードが保持しているおり、パケット中に経路情報は保持されていない。ルートの決定には、IEEE802.15.4 の物理層/MAC 層で 사용되는リンク品質指数(LQI: Link Quality Indication)を評価対象にしており、受信電力の大きさがルート経路に大きく影響する。なお ZigBee ルータは、ZigBee コーディネーター同様に、スリープ状態に入ることを許されておらず、常に起きていなければならない。また ZigBee エンドデバイスよりも消費電力が大きいため、パソコンや AC アダプター等からの給電が必要である。

ZigBee エンドデバイスは、ZigBee ネットワークの最下層である末端ノードを示す。ZigBee ルータもしくは ZigBee コーディネーターとしか、通信することが許されていないため、機能が限定されている。ZigBee エンドデバイスは、ZigBee ルータのようにデータを中継したりする必要がないため、消費電力は比較的低く、ハードウェアに求められるスペックは最も低い。

そして本論文では、スター型ネットワークトポロジーを採用し、ZigBee コーディネーターと ZigBee エンドデバイスの各 1 台で構築している。

第4章 実験準備

実験を行うにあたって、本章では実際に作成した微生物燃料電池の説明を行う。数種類の微生物燃料電池がある中から、底泥型にした理由を最初に述べる。そして作成にあたって、実際にどのような素材を用いれば良いのか、理由を明確にした上で作っていく。また底泥型微生物燃料電池を直接、無線回路につなげば期待通りに駆動する、というものでもない。なぜなら微生物燃料電池は低電圧、低電流なので、負荷に対して十分なエネルギーを供給出来ないからである。そこで、期待通りに無線回路を駆動するためのパワーマネジメント回路について述べる。そして最後に無線回路部について述べたのちに、次章で実験内容について説明する。

4.1.1 微生物燃料電池とバッテリーレス型センサー

槽型の微生物燃料電池は、水中の存在する微生物と有機物に用いることを前提としており、IoT センサーとして汎用性は軽減される。なぜなら IoT のアプリケーションとして、利用できる環境の制限が大きくなるためである。底泥型微生物燃料電池であろうと、槽型の微生物燃料電池であろうと、その両者には発電能力としての差はあまりない。どの環境で用いるか、何を目的とするかで構造を選択することが重要である。したがって本論文では、微生物燃料電池の構造は、底泥型微生物燃料電池を採用する。

先行研究では、もっぱら微生物燃料電池の性能に焦点を当て、それを廃水処理の観点から評価する研究が多い。ワイヤレスセンサーのバッテリーとして微生物燃料電池を適用した事例は少ない。しかしその少ない先行事例の中でも、底泥型微生物燃料電池を用いた研究は行われているが、ワイヤレスセンサーを展開する環境は、海底などの大自然を対象にしたものがほとんどである。その場合、底泥型微生物燃料電池としての規模は大きく、コストがかかるものになってしまう。コスト負担に追い打ちをかけるの如く、電極にはカーボン素材やグラファイト素材が採用されることが多い。そうってしまったては、多数のワイヤレスセンサーの展開は現実的ではない。電極素材の詳細に関しては、「4.1.2 底泥型微生物燃料電池の作成」の段落で述べるとする。本論文のように、IoT センサーによりセンサーネットワークの構築を想定した場合、出来るだけワイヤレスセンサー1台あたりのコストは抑え、展開しやすいように小規模である必要がある。つまりバッテリーレス化を前提とした場合、出来るだけアプリケーションの汎用性と、センサーの設置展開の利便性を兼ね備えることが重要である。

上記では、バッテリーレス化にあたり、どの微生物燃料電池も同等の持続的なエネルギー供給能力を持つものとして述べた。2章で述べたように、底泥型微生物燃料電池を応用すれば、植物型微生物燃料電池となる。植物型微生物燃料電池は他の微生物燃料電池よりも、発

電の持続性面から大きなアドバンテージがある。なぜなら植物が有機物の供給者であるからだ。これは大きなメリットであり、デメリットでもある。森林地区のように、通年を通して植物が生命力を保つことが出来、植物を人間が育てる必要がない場合、バッテリーとしての持続性は半永久的なものになる。このことは、バッテリーレス型 IoT センサーとして、とても有効である。しかしその反面、植物を育てたり、植物が季節ごとで枯れてしまうようであれば、バッテリーレス型 IoT センサーのバッテリーとして微生物燃料電池を用いる必要はない。なぜなら定期的な保守点検が必要になってしまうからである。また電子生産菌と植物の相性が合わずに、微生物燃料電池が発電しないという事態は大いに考えられる。植物型微生物燃料電池で使用可能な植物は限られている。さらにエネルギーハーベスティングシステムとして考えた場合、植物型微生物燃料電池は光合成を利用しているため、システムのパラメータ設計が比較的簡単ではない。一方で底泥型微生物燃料電池の有機物供給源は植物ではない。光合成によらないため、環境変化における影響は比較的少ないと言える。また植物との相性を考慮する必要もなく、エネルギーハーベスティングシステムの設計のしやすさにもつながる。次に、実際に作成した底泥型微生物燃料電池について述べる。

4.1.2 底泥型微生物燃料電池の作成

底泥型微生物燃料電池は、図 4 のような構造になっている。したがって、容器、水、土壌、電極を揃える必要がある。

まず微生物燃料電池の作成に最も影響を及ぼす電極の作成から述べる。2 章で説明したように、電極にはカーボン、グラファイト素材か金属素材が用いられる。カーボン、グラファイト素材は炭素原子で構成され、それ作られた素材は多孔質である。多孔質とは素材の表面上に、肉眼では見えない程の小さな穴をもつ性質のことである。多孔質を持つメリットは、それに微生物が付着しやすいことである。多数の微生物の付着は、電極に電子を直接渡すことが出来る数を意味するので、結果として発電能力の向上につながる。したがって、多くの微生物燃料電池の研究では、カーボン素材かグラファイト素材で作成された電極が用いられる。それらの素材を採用するには、他の理由も存在する。カーボン、グラファイト素材は金属に比べて、腐食しないことである。センサーネットワークの長期運用を考慮した場合、電極の劣化は微生物燃料電池の機能を失うこと等しいので、回避しなければならない問題である。また多種の素材の中で、カーボン、グラファイト素材は高い導電性を持っている点も一つの利点である。ここまでで、カーボン、グラファイト素材を採用する意義は大いにありそうな気がする。しかし IoT センサーの最もシリアスな問題の一つに、生産コストがある。これらの素材は単価が高いため、IoT センサーに用いるには現実性がない。そこでもう一方の金属素材に注目する。微生物燃料電池に関する研究として、金属素材が採用されることは少ない。なぜなら、多孔質ではなく、また腐食しやすいので電極として使用するには、

デメリットが多いからである。しかし多種ある素材の中で、最も導電性が高い素材である点やコストがかからない点では、金属素材が優れている。さらに実際に微生物燃料電池を作成する際に、思い通りの形状に加工しやすい点も一つのメリットである。本論文では、金属素材に焦点を当てて、底泥型微生物燃料電池の電極を作成した。

一概に金属と言ってもたくさんの種類が存在する。金属の種類について考える。腐食は金属の特徴であるが、バッテリーレス型 IoT センサーを長期運用するに当てて、金属の腐食は避けられなければならないと上述した。ここでその中でも、優れた耐食性を持つ金属として知られているステンレス鋼に目を付けた。ステンレス鋼は、約 10.5%以上のクロムを含有している鉄を指す。クロムを配合させることで、表面に不導体酸化被膜が形成され、腐食しにくくなる。ステンレス鋼を電極に用いることで、腐食のデメリットを軽減させることができる。次は「多孔質ではない」という金属のデメリットについて考える。土壌中には多種の微生物が存在する。その中で、電極周りにいる微生物を付着させ、そこで増殖させることが多孔質の目的であった。つまり、微生物を育てられる環境を電極周りに作ってあげれば良いことになる。そこで、入手性が良い活性炭素に注目した。この活性炭素は、カーボンやグラファイト素材と同様に、多孔質の炭素を主成分とした物質であり、数 mm 程度の小さな粒である。この活性炭素をステンレス鋼に接着させて、それを電極とした。こうすることで、金属のデメリットを補えつつコスト効率高い電極とすることが出来る。微生物燃料電池で、微生物が必要なのはアノード極側のみなので、活性炭素はアノード極にのみ接着した。実際に作成した電極を以下に示す。



図 10. 左がアノード極, 右がカソード極

アノード極もカソード極も、電極は直径約 11cm、厚さ約 0.3mm 程度のサイズである。可能な限り表面積を大きくするため、電極の直径は容器の直径とほぼ同サイズである。ここで容器に関しては、多数の IoT センサーの設置展開の利便性を考えて、片手で持ち運べるようなものを選んだ。サイズは直径 12.4cm、高さ 17.0cm で軽いプラスチック素材を選んだ。さらに底泥型微生物燃料電池で用いる水に関しては、真水や蒸留水などではなく、水道水を用いた。真水などでは電解質が含まれていないため、底泥型微生物燃料電池の内部抵抗上昇につながってしまうからだ。なおリード線と電極は、ハンダ付けして接合した。最後に土壌に関して述べる。上記のパーツを用いて、戸山公園の土壌を少し拝借して実験を行った。すると戸山公園の土壌でも発電することが確認できた。また戸山公園以外にも、自宅の庭の土壌でも発電が確認できた。しかし最大出力電圧があまり高くない、出力電圧に安定性がない、という理由から、より高い発電能力を発揮できる土壌を求めた。そこで旧湿地であった矢川緑地(東京西地区)の池底の土壌を採用した。その場所の様子を以下に示す。



図 11. 底泥型微生物燃料電池で用いた土壌

上記で述べた電極、容器、水、土壌等を図4の構造に倣って、実際に作成した底泥型微生物燃料電池が以下になる。また容器に土壌を入れるときは、出来るだけ土壌内の酸素を抜くため、容器を定期的に地面に打ち付けながら入れた。

そして本論文では、その底泥型微生物燃料電池を実験で用いた。この底泥型微生物燃料電池の評価方法と、発電能力の評価は、「5章 実験」で述べる。

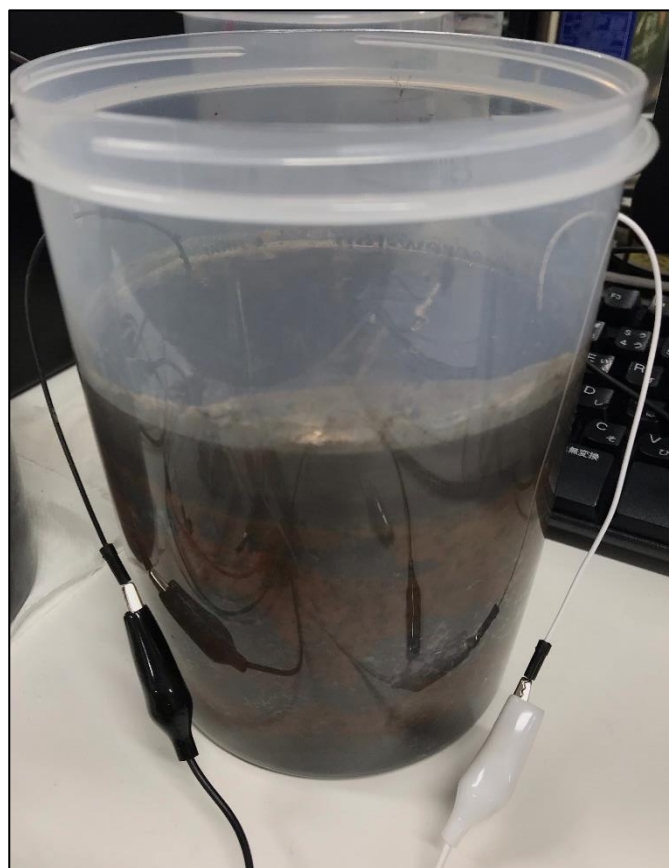


図 12. 実験で用いた底泥型微生物燃料電池

4.1.3 電圧自動測定装置の作成

微生物燃料電池の電圧測定には、電圧自動測定装置を用いる。電極に付着した微生物は、時間の経過とともに増殖する。各電極の反応が進む頻度が増え、放出される電子が増えた、つまり電流が増えたとみなせるため、微生物燃料電池の出力電圧が推移する。一般的に、微生物燃料電池を作成直後よりも、一定期間後の方が出力電圧は高くなる。微生物が増殖すればするほど発電能力が示すが、ある地点で頭打ちになる。それは、アノード極の表面積上で

の増殖の限界が訪れるからである。したがって出力電圧が、どのように推移するかを常に把握するために、電圧を自動測定する装置を用いる。

本論文では、電圧自動測定装置を作成するために Arduino を用いた。Arduino のアナログ定格最大入力 は 5.0V で、そして高い内部抵抗を持つので、底泥型微生物燃料電池の電圧測定に使用可能である。自動測定するために用いたソースコードを以下に示す。複数台の電圧自動測定は可能だが、下記のソースコードは一台のみ測定した場合。また電圧自動測定装置の様子も以下に示す。

表 2. 電圧自動測定装置のソースコード

```
void setup(){
  Serial.begin(9600);
}

void loop(){
  float val0 = analogRead(A0); //アナログ入力を読み取る
  val0 *= 5.0/1024.0; //voltage に変換
  Serial.println(val0); //シリアルモニタに出力
  delay(10000); //10sec 待機
}
```

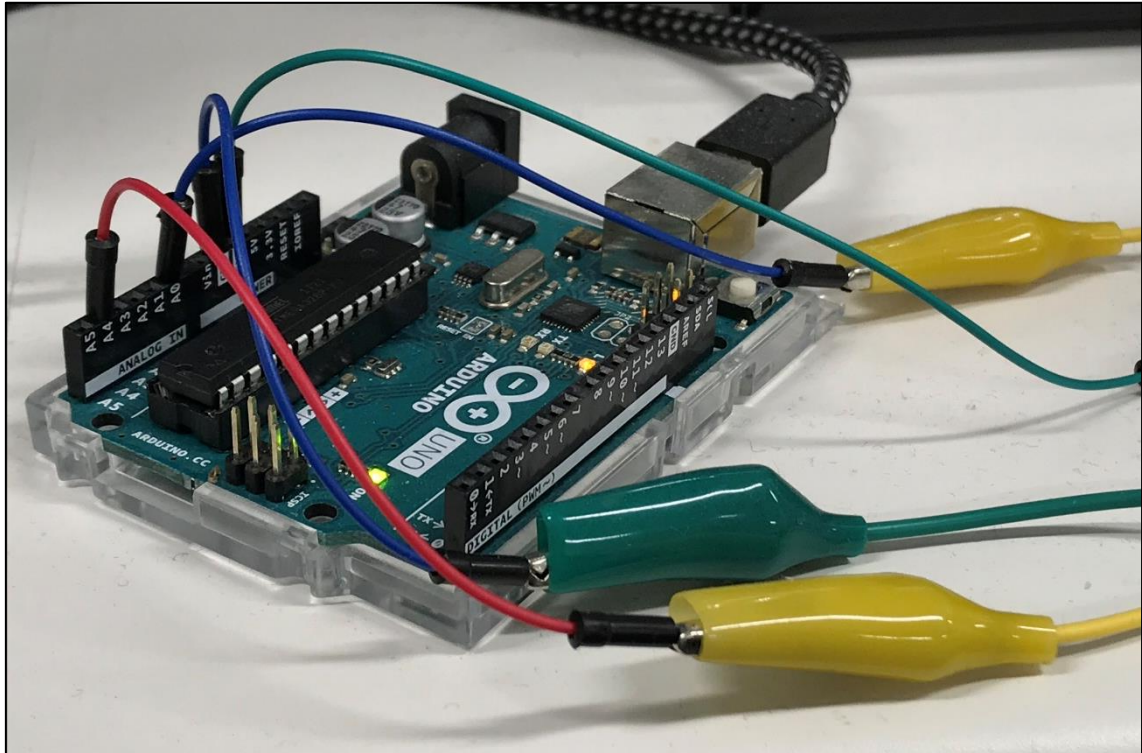


図 13. 電圧自動測定装置

4.2 パワーマネジメント回路

底泥型微生物燃料電池を直接、無線回路につなげば期待通りに駆動する、というものでもない。なぜなら微生物燃料電池は低電圧、低電流なので、負荷に対して十分なエネルギーを供給出来ないからである。そこで、期待通りに無線回路を駆動するための、パワーマネジメント回路が必要になってくる。パワーマネジメント回路は、DC/DC コンバータと電気二重層コンデンサで構成される。

一般的にマイコンなどを駆動させるのに 3.3V ないしは、5.0V が必要になる。ZigBee は低消費電力であるため、それに用いられるマイコンは、3.3V で駆動するタイプがほとんどである。どの程度の電圧から昇圧可能かは、DC/DC コンバータによって様々である。本論文で用いた DC/DC コンバータは、数百 mV の低電圧から 3.3V ないし 5.5V まで昇圧可能な LTC3105 を搭載したモジュールを使用する。用いたモジュールは、電力点制御が可能である。電力点制御とは、エネルギー源の出力を最大出力にある程度の維持ができる制御のことである。微生物燃料電池は定電圧電源ではないため、負荷の抵抗値に応じて、時間とともに出力電圧が下降する。負荷の抵抗値が大きい場合は、負荷に流れる電流が小さいため、電圧降下速度が遅い。しかし、負荷の抵抗値が小さい場合は、負荷に流れる電流が大きいため、微生物燃料電池がその出力電流をすぐに維持できなくなり、電圧降下が急峻になる。微生物

燃料電池の出力電圧が不安定になると、DC/DC コンバータへの入力電圧も不安定になる。そうなった場合、DC/DC コンバータモジュール内のコイルによって、誘導起電圧が発生する。誘導起電圧に電流が発生し、不足した電流を補うことで、不安定になった電圧を維持しようとする。これが電力点制御である。また DC/DC コンバータ内で消費する電流も少ないため、微生物燃料電池から得られた限られた電流を効率良く使用することが出来る。

なお無線回路を駆動させるには、3.3V の電圧だけでは不可能である。無線回路に 3.3V の電圧を印加出来るように、無線回路が要求する電流も流さなければならない。ZigBee の消費電力は mW 級なので、電流の消費も少ない。しかし、微生物燃料電池から得られる電流はとても少なく、常に ZigBee 無線回路が要求する電流を渡すことは出来ない。そこで、微生物燃料電池からの電流を一時的に蓄え、それをある瞬間で ZigBee 無線回路に流し込む、間欠駆動型の方法をとることにする。その方法を実現させるために、コンデンサが必須となる。コンデンサは電流を蓄え、電流の量に応じて、自身の電圧を上昇させることで、エネルギーを蓄積する受動素子である。コンデンサの静電容量は数 nF から数十 F まで幅広くある。微生物燃料電池のようなエネルギー供給能力が低いエネルギー源に対しては、大容量の静電容量が必要になる。大容量の静電容量をもつコンデンサは、電気二重層コンデンサもしくは、スーパーキャパシタと呼ばれる。大きなエネルギーを蓄積できる分、小容量の静電容量をもうコンデンサに比べて、物理的なサイズが少し大きくなる。また耐電圧が低いというデメリットもある。耐電圧が低いため、DC/DC コンバータを介してコンデンサに電流を溜めるのではなく、最初に微生物燃料電池から直接電流を溜める方法にした。そして本論文では、7.5F の静電容量を持つ電気二重層コンデンサを使用した。以下に、DC/DC コンバータと電気二重層コンデンサの様子を示す。

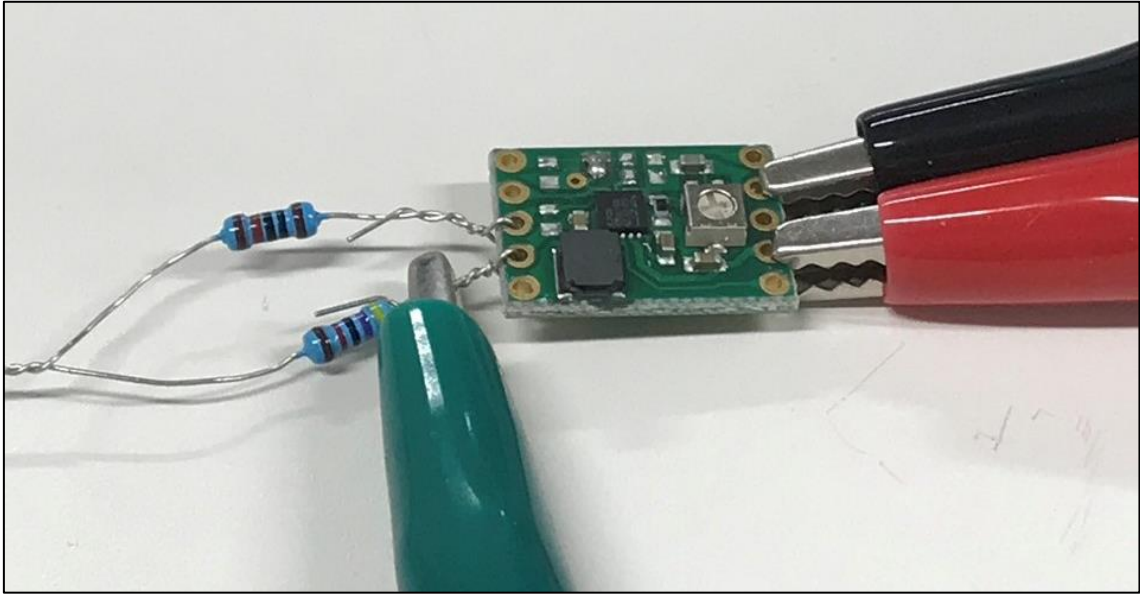


図 14. DC/DC コンバータ



図 15. EDLC

4.3 ZigBee

ZigBee 規格を用いたデバイスは、市販で数種類発売されている。本論分においては、Digi 社より販売されている XBee モジュール(XBee S2C)を採用した。XBee は個人でも入手性がとても良く、専用のソフトウェア(X-CTU)から各種パラメータの設定を操作することが出来る。パラメータは、スリープタイム、サンプリングレート、ネットワーク情報など詳細に決めることが可能である。また自分で作成したパケットを任意のタイミングで送信することも可能で、ZigBee コーディネーターから ZigBee エンドデバイスを遠隔に操作することも出来る。なお ZigBee プロトコルを使用するので、スター型、メッシュ型、ツリー型など、用途に合わせたネットワークの構築も出来る。以下に使用した XBee S2C の様子を示す。

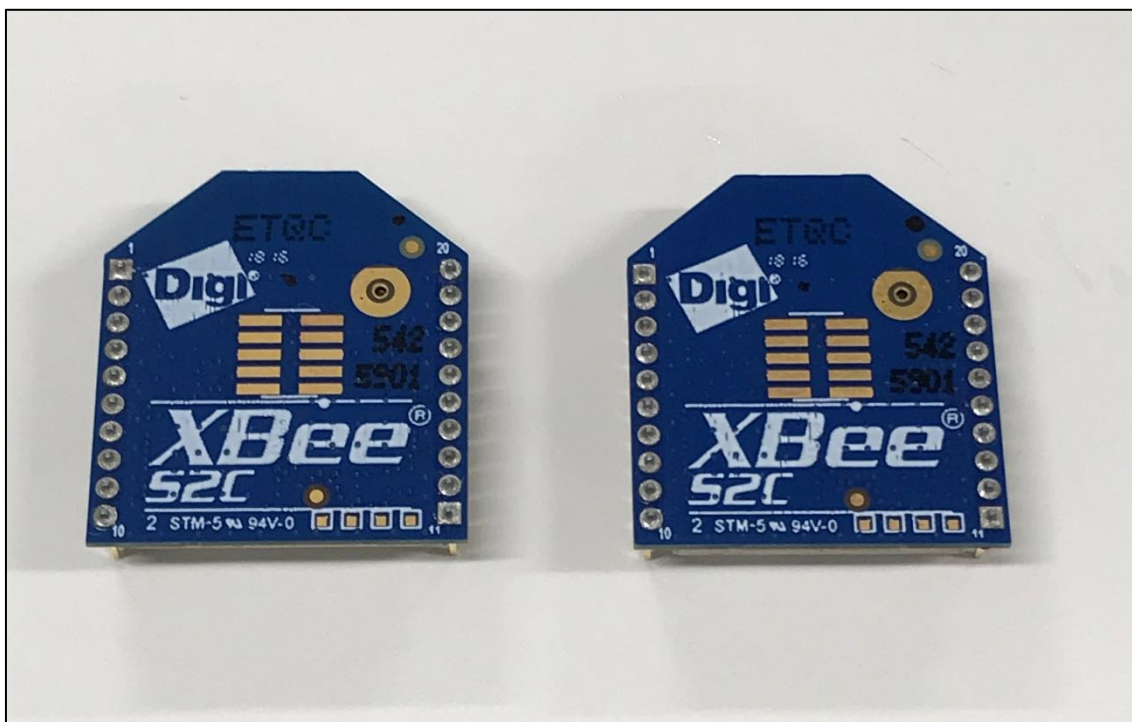


図 16. XBee モジュール

ちなみに XBee には、ZigBee 規格以外にも Wi-Fi(IEEE802.11)を搭載したモデルや、USB 規格との変換を行って、USB ポートに差し込むモデルなど、様々なモデルがある。拡張性はないものの、様々なモデルが販売されていることで、ユーザの使用環境に柔軟に対応できる利点もある。

4.4 エナジハーベスティングシステム

これまで紹介した底泥型微生物燃料電池、パワーマネジメント回路、そして XBee モジュールを用いて、本論分で提案するエネルギーハーベスティングシステムの概念図を以下に示す。

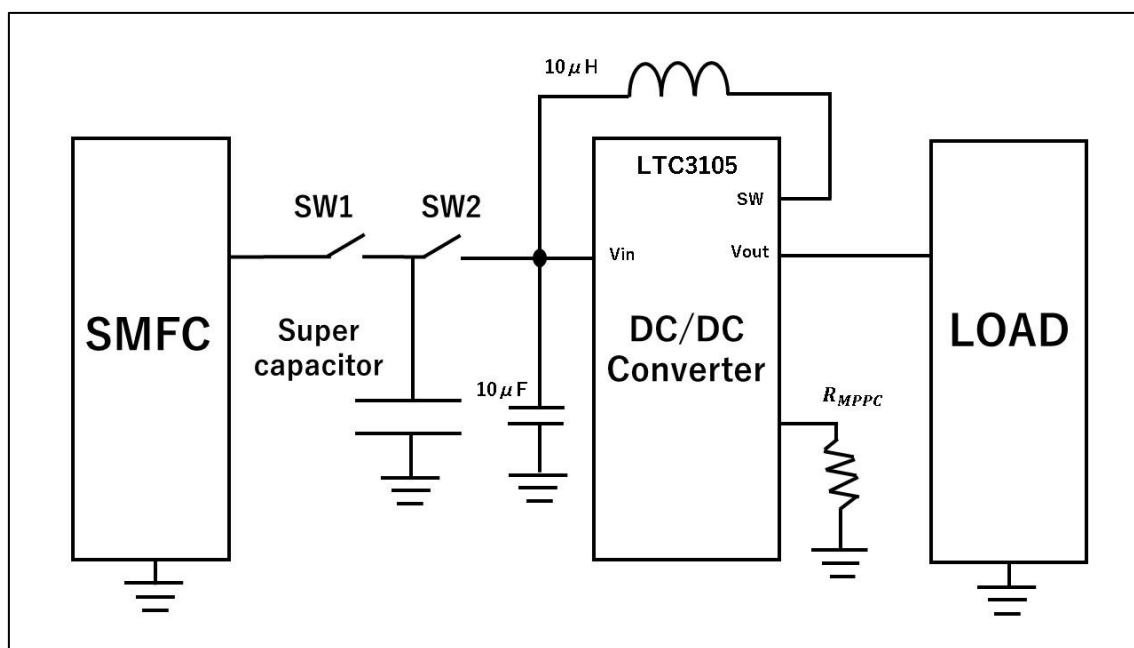


図 17. 提案するエナジハーベスティングシステム

スイッチ 1 と 2 は、閾値を超えるまでエネルギーを充電し、閾値のエネルギーが溜まったら、放電する役割を持たせる。スイッチの具体的な動きに関しては、「第 5 章 実験」にて述べる。 V_{in} と V_{out} はそれぞれ、DC/DC コンバータの入力端子と出力端子を示す。そして、DC/DC コンバータの SW 端子に接続された $10\mu\text{H}$ のインダクタンスと $10\mu\text{F}$ のキャパシタは、MPPC によって誘導起電力を発生させる。MPPC は R_{MPPC} の抵抗値によって、電力点を変更できる。なお LTC3105 には、 R_{MPPC} の抵抗値と最大電力点における電圧に、以下の関係式がある。

$$V_{MPPC} = 10\mu\text{A} \times R_{MPPC} \quad (6)$$

R_{MPPC} にはインピーダンスマッチングが成り立つように、内部抵抗と等しい抵抗値を設定する。式(6)より、DC/DC コンバータの入力電圧が V_{MPPC} 以下の電圧にさがったとき、MPPC が起動する。次の5章で、作成した底泥型微生物燃料電池の評価を行い、そして行った実験について具体的な説明と結果を示す。

第 5 章 実験方法と結果

この章では、「第 4 章 実験準備」で作成した実機を用いて実験を行った内容について述べる。まずは底泥型微生物燃料電池がどの程度の発電能力を保有しているのか、具体的な数値を求める。なおその際に、「第 2,4 章 微生物燃料電池の評価」で述べていない評価方法についての説明を行う。また内部抵抗と最大電力点の関係についても触れる。底泥型微生物燃料電池の評価後、実際に ZigBee ネットワークの構築を試みる。ZigBee エンドデバイスを提案するエネルギーハーベスティングシステムで間欠駆動させることで、微生物燃料電池が従来のバッテリーに置き代わる可能性を持つことを示す。エネルギーを溜める期間と、ZigBee が駆動する期間の具体的な数値を実験によって求める。また、実際に受信したデータに関しても述べる。

5.1 底泥型微生物燃料電池の発電能力

第 4 章で本論文で用いた底泥型微生物燃料電池の作成について述べた。ここでは作成した底泥型微生物燃料電池が、実際にどの程度の発電能力を持っているを述べる。まずは、底泥型微生物燃料電池のオープン電圧の推移を、電圧自動測定装置を用いて調べる。オープン電圧とは、微生物燃料電池の負荷の抵抗値を無限にしたときの電圧のことである。その結果を以下のグラフに示す。

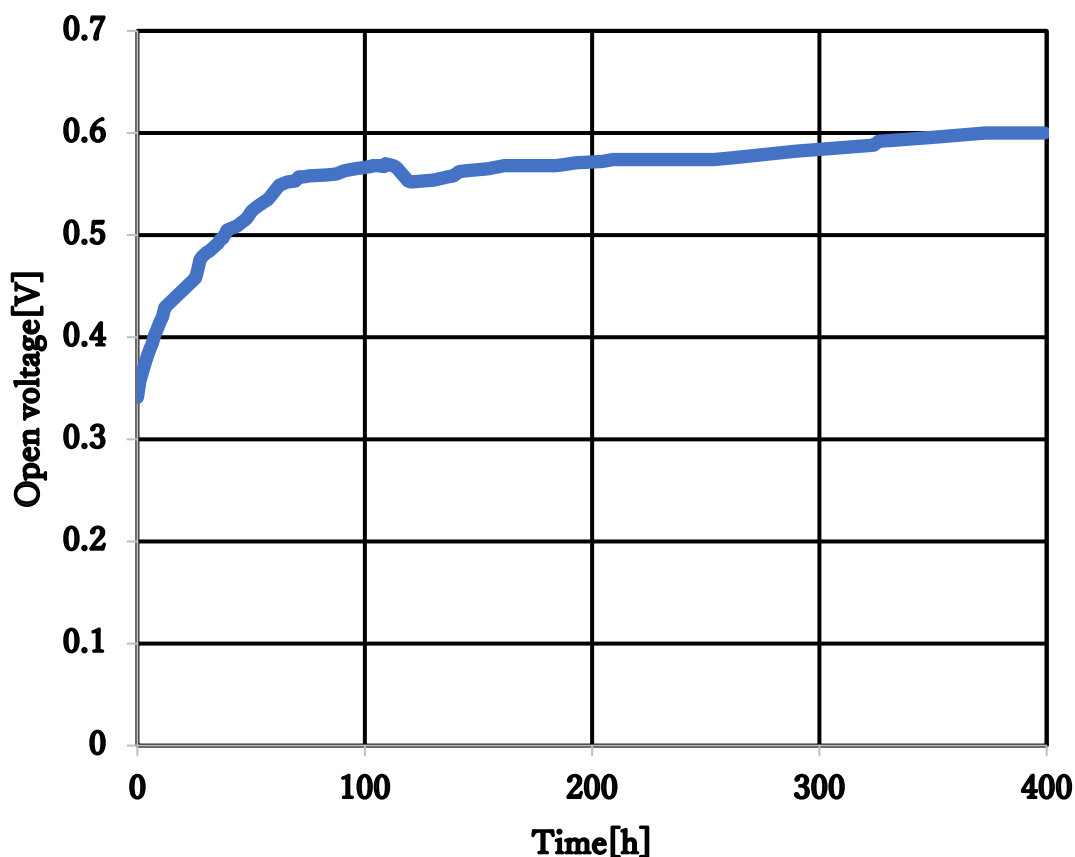


図 18. 作成した底泥型微生物燃料電池の電圧推移

約 2 週間(16.6 日間)のオープン電圧の電圧変化を示したグラフである。微生物燃料電池を作成した直後の時点の電圧は、0.341V が得られた。そしてオープン電圧は、時間の経過とともに少しずつ上昇しているのが分かる。これは微生物がアノード極に付着し、そして増殖したからだと考えられる。微生物が増殖すれば、電極における反応起こる頻度が多くなり、電子がたくさん放出されるようになる。それに伴い、電圧が上昇した。しかしアノード極に存在可能な微生物には限りがあるため、定常状態があるとき訪れる。本論文で用いた底泥型微生物燃料電池は、0.6V の最大電圧で止まった。定常電圧が得られるのにかかる時間は、作成した微生物燃料電池によって異なる。一般的にカーボンやグラファイト素材で作成された電極は、金属素材の電極より定常電圧に達するまでに時間がかかる。このことは、多孔質により多くの微生物が増殖可能を意味し、最終的に得られる最大電圧が高くなるという点では優れている。しかしより多くの時間がかかるので、生産性が低いとも考えることが出来る。これは IoT センサーとしては、大きな問題になり得る。

またオープン電圧が上昇する過程で、一時的にオープン電圧が 0.568V(計測開始から 112 時間後)から 0.552V(計測開始から 120 時間後)に下降しているのが分かる。これは微生物燃

料電池内部もしくは取り巻く環境が変化したからだと考えられる。したがって環境変化が激しい場所への設置は、回路のパラメータ最適化など、エナジハーベスティング回路の設計が難しくなると考えられる。今回の測定における小さな下降は、微生物燃料電池内の含水率が変化したために起こった下降だと考えられる。

ここで微生物燃料電池の発電能力を、より詳細に評価するために電力密度曲線を求める。電力密度曲線は、微生物燃料電池が負荷に供給可能な電力と負荷の抵抗値の関係を示したグラフである。これは第 2.4 章で述べてない、微生物燃料電池の評価方法の一つであり、特に発電能力の評価に重きを置く際に使われる。「4.2 パワーマネジメント回路」で述べたように、微生物燃料電池は低電圧電源ではないので、負荷の抵抗値によって、電流、電圧ともに値が変化する。電力密度曲線を求めるために、まず初めに、微生物燃料電池の電流、電圧、そして負荷の抵抗値の関係を実測しなければならない。この測定はまず、微生物燃料電池に固定抵抗器を接続し、マルチメータで測定した値を読み取る。そして測定した電圧値と抵抗値をオームの法則に従って計算し、流れている電流を求める。これを固定抵抗器の値を変化させながら、用意した抵抗器全てに関して計算する。ここで、微生物燃料電池ならではの注意点がある。固定抵抗器を付け替えたら、それに印加される電圧が安定するまで、少し待たなければならない。待つ時間は、微生物燃料電池によって異なるが、数分から 20 分程度と言われている。なお固定抵抗器の抵抗値は、最大から最小にかけて順次変化させていく。また測定は、出来るだけ早く終わらせる必要がある。なぜなら微生物燃料電池が置かれている環境は、一日のうちに少なからず気温などの変化があるためである。その環境変化が微生物燃料電池に影響を及ぼす場合もあるし、及ぼさない場合もある。したがって、他の条件が変わって、実測結果に影響を及ぼさないようにするため出来るだけ一日で測定しきってしまう必要がある。実測にあたって、固定抵抗器の抵抗値は、 $1M\Omega$ から 100Ω の値を用いた。その間の抵抗値は適度な間隔をあけた抵抗値を用いた。以下にその実測結果を青色のグラフとして示す。

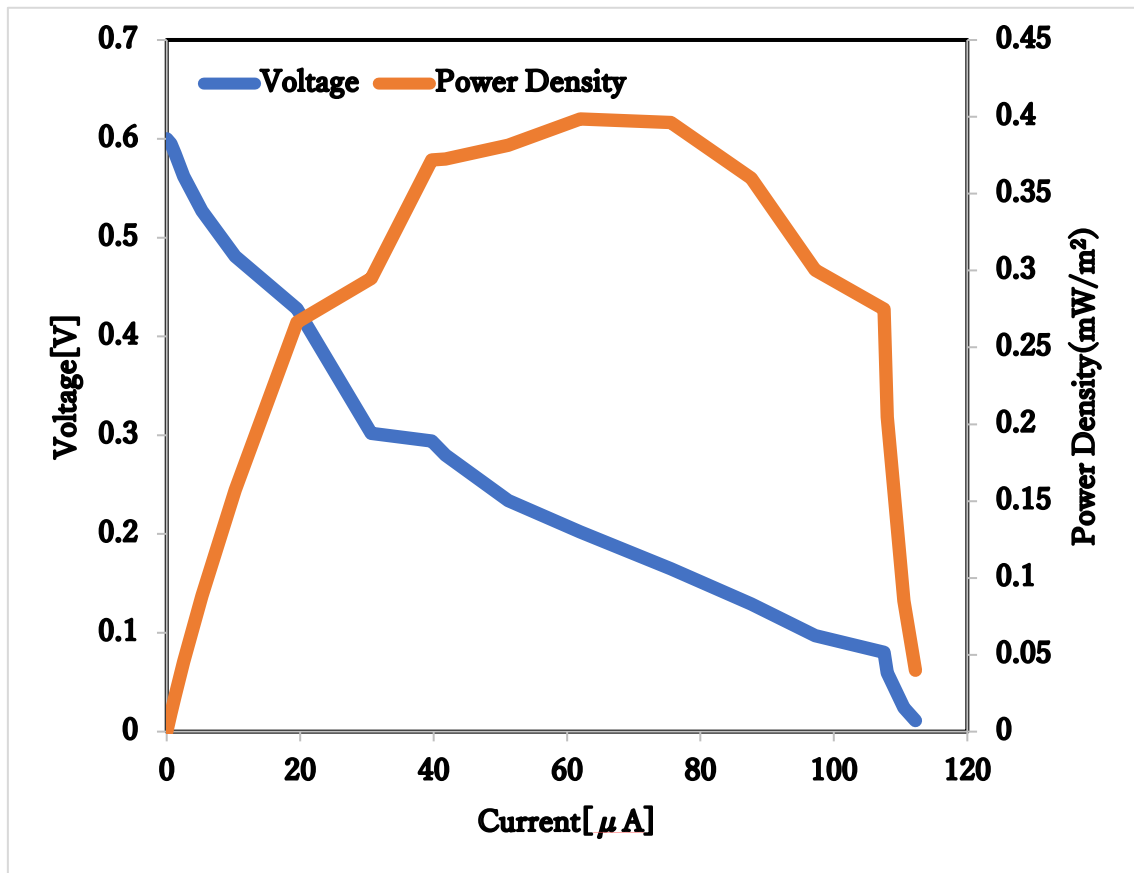


図 19. 電流電圧の関係と電力密度曲線

抵抗値が大きいほど、得られる出力電圧も大きく、電流がほとんど流れなくなる。一方で抵抗値が小さいほど、得られる出力電圧も小さく、電流がたくさん流れる。つまり線形の関係がある。ここで今、電流と電圧が分かっているがあるので、 $P = I \times V$ より、各抵抗値の場合における供給可能電力を求められる。また微生物燃料電池は電極の面積によって、発電能力が異なるため、単位表面積あたりの電力に直す必要がある。もし電極の表面積がアノード極とカソード極で異なる場合は、アノード極の表面積を用いる。これが電力密度曲線である。実際に計算したグラフを、上記のオレンジ色グラフで示す。電力密度曲線は、上に凸の非線形グラフになる。ある抵抗値のときに、供給可能最大電力となる。その値を最大電力点といい、本論文で用いた底泥型微生物燃料電池の MPP は、 $0.399\text{mW}/\text{m}^2$ であった。このとき抵抗値、電圧、電流は $3.27\text{k}\Omega$ 、 202mV 、 $61.7\mu\text{A}$ であった。微生物燃料電池から最大電力を負荷に提供するために、最大電力点で動作するように調整する必要がある。「4.2 パワーマネジメント回路」で述べたように、本論文で用いた DC/DC コンバータは、最大電力点制御の機能を持っている。この機能を利用してより多くの時間、微生物燃料電池が MPP で動作するように整合をとる。

ここで、微生物燃料電池の内部抵抗に関して述べる。微生物燃料電池の内部抵抗は常に一定ではない場合がある。時間の変化とともに内部抵抗の多少変化する。内部抵抗には電極や微生物の数、その他分子の濃度によって変化するからである。外部抵抗値が一定だとしても内部抵抗値に変化があれば、外部抵抗に供給できる電力も変わってしまう。そうすると、最大点電力点が変わる。しかし一般的には、微生物燃料電池の内部抵抗は、システム作成時の内部抵抗を使う。をなお測定供給電力、外部抵抗、内部抵抗は以下の関係がある。

$$P = R_{out} \left(\frac{E}{R_{in} + R_{out}} \right)^2 \quad (7)$$

P は負荷へ供給する電力を示す。 R_{out} と R_{in} はそれぞれ、外部抵抗と内部抵抗を示す。また E は微生物燃料電池の起電力を示す。 P を最大にするときの条件を考える。問題を置き換え、右辺の逆数が最小となる条件を探す。

$$\begin{aligned} R_{out} \left(\frac{E}{R_{in} + R_{out}} \right)^2 &= \frac{1}{R_{out}} \left(\frac{R_{in} + R_{out}}{E} \right)^2 \\ &= \frac{1}{E} \left(\frac{R_{in} + R_{out}}{R_{out}} \right)^2 \\ &= \frac{R_{in}^2}{R_{out}} + 2R_{in} + R_{out} \end{aligned} \quad (8)$$

右辺が最小になる条件は、内部抵抗を一定とすると、 $\frac{R_{in}^2}{R_{out}}$ と R_{out} が最小になるときである。

このことから相加相乗平均より、

$$\frac{\frac{R_{in}^2}{R_{out}} + R_{out}}{2} \geq \sqrt{\frac{R_{in}^2}{R_{out}} \times R_{out}} = R_{in}$$

となり、式(7)が最小値をとるのは、 $\frac{R_{in}^2}{R_{out}} = R_{out}$ のときである。つまり、負荷に供給する電力 P が最大となるときは、 $R_{out} = R_{in}$ を満たすときである。またこの時の P の最大値は式(7)より、

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R_{in}} \quad (9)$$

したがって、最大電力点を求めるには、微生物燃料電池の内部抵抗を求めれば良いことが分かる。このことから最大電力点を求めるために、外部抵抗を何回も変えて測定する必要はない。内部抵抗を求めて、外部抵抗がその抵抗値をとるように整合をとる。内部抵抗を求める方法はいくつかあり、最も簡単と思われる方法は、異なる外部抵抗の抵抗値を 2 回測定するだけである。キルヒホッフの法則より、微生物燃料電池の内部抵抗 R_{in} と起電力 E は、式(10)で表すことが出来る。

$$\begin{cases} V = E(R_{in} + R_{out1}) \\ V = E(R_{in} + R_{out2}) \end{cases} \quad (10)$$

式(9)の連立方程式を解くだけで、内部抵抗を求めることが出来る。ここで注意したいのは、微生物燃料電池の各パラメータは、環境変化に応じて刻々と変化する。したがって、1 回目の内部抵抗の測定と、2 回目の内部抵抗の測定は値が異なる可能性がある。その場合は、複数回の測定を行うことで、内部抵抗の平均を求める。

5.2 ZigBee ネットワーク構築の実験

エナジーハーベスティングシステムを実際に用いて、ZigBee ネットワークを構築する。まず、底泥型微生物燃料電池とパワーマネジメント回路によって、ZigBee エンドデバイスを駆動させる。パワーマネジメント回路によって、エネルギーを蓄えて、閾値を超えたら、一気にエネルギー放出するので、ZigBee エンドデバイスは間欠に駆動する。また、大きなエネルギーを蓄えることが出来るように、本実験では 2 台の底泥型微生物燃料電池を直列接続して実験を行った。なお XBee モジュールには、温度センサー(LM61CIZ)が接続され

ている。一方、ZigBee コーディネーターは、ノートパソコンに接続する。ZigBee エンドデバイスが駆動している間は、温度センサーから気温を取得し、それを ZigBee コーディネーターに送信する。実験の様子を以下に示す。

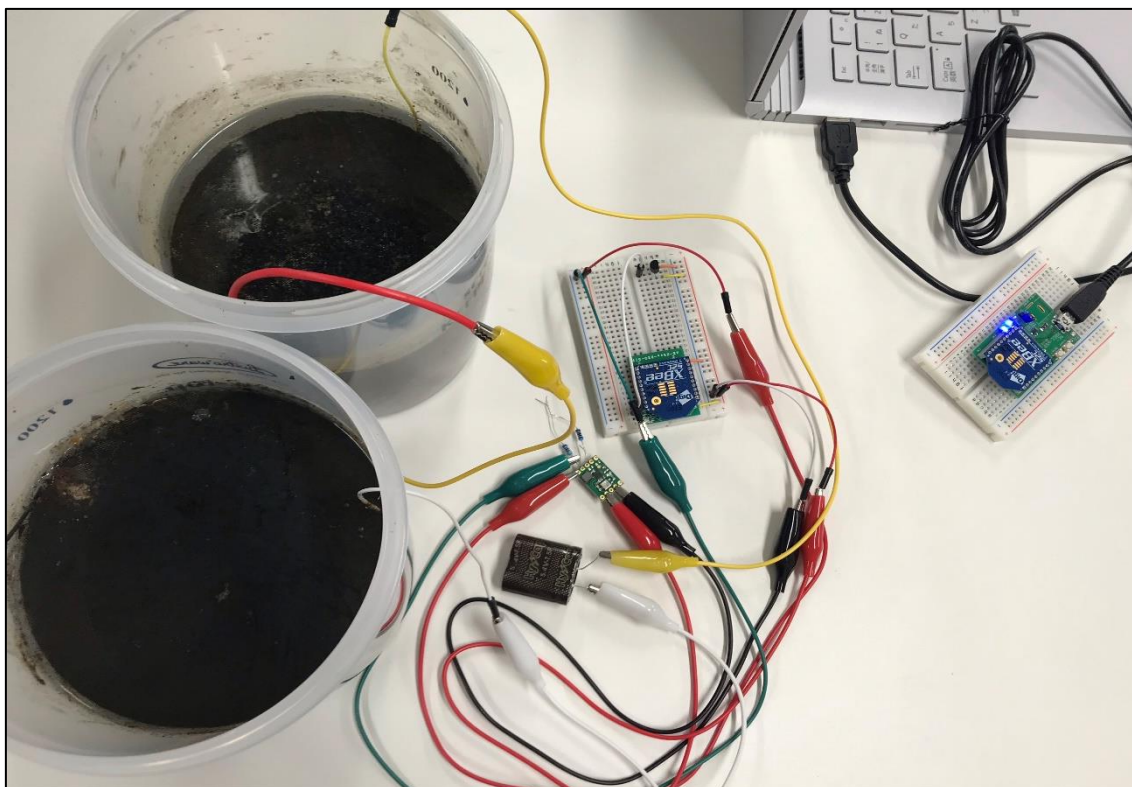


図 20. 実験の様子

実験の手順は、図 17 中の SW1 と SW2 を切り替えながら行う。まず初めに SW1 はクローズドで SW2 はオープンの状態である。この段階では、スーパーキャパシタが微生物燃料電池から直接エネルギーを蓄える。「5.1 底泥型微生物燃料電池の発電能力」で示した微生物燃料電池を 2 個直列接続で用いているので、図 18 で得た最大出力電圧の約 2 倍で、実機では 1.123V が最大出力電圧となる。蓄積したエネルギーが閾値(1.1V)を超えたら、SW1 はオープンになり、SW2 はクローズドに切り替わる。そして、溜まった電流が一気に DC/DC コンバータを介して、ZigBee エンドデバイスモジュールに流れ込む。このとき電圧は DC/DC コンバータで 3.3V まで昇圧される。ZigBee エンドデバイスモジュールにエネルギーが供給されている間、100ms のサンプリングレートで環境情報をセンシングする。温度センサーが読み取った値を 100ms で ZigBee エンドデバイスが取得する。そして、取得した値をバケットに載せて、離れた位置にいる ZigBee コーディネーターに向けて送信する。

DC/DC コンバータの出力電圧が 3.3V を下回れば、ZigBee エンドデバイスは駆動できなくなるので、SW1 をクローズドにし SW2 をオープンにする切り替える。そして、スーパーキャパシタにエネルギーを再度充電する。以上のような実験手順を示した結果を以下に示す。

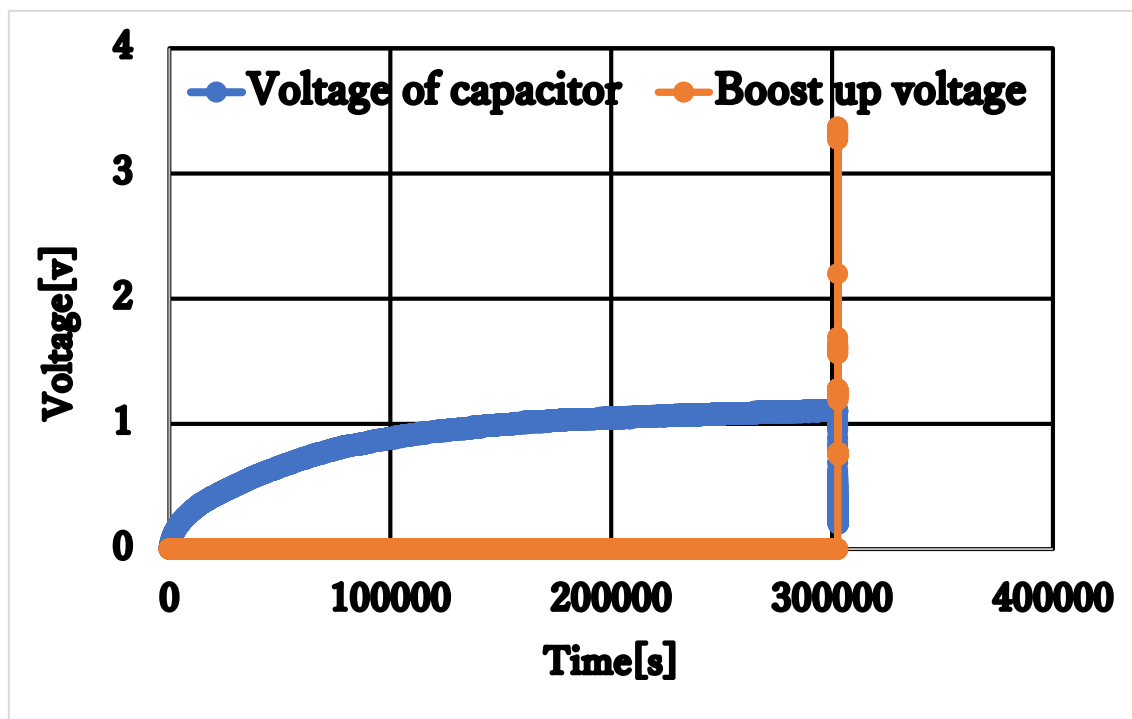


図 21. スーパーキャパシタと DC/DC コンバータの電圧推移

青色グラフは、スーパーキャパシタが充電と放電したときの電圧推移の全体を示している。橙色グラフは、DC/DC コンバータの出力電圧を示している。

スーパーキャパシタが 1.1V の電圧まで上昇させるのに、302600s(84h)必要とした。スーパーキャパシタがほぼ満充電出来たら、SW1、SW2 が切り替わる。そしてスーパーキャパシタの電圧が間もなくして降下し、その間に DC/DC コンバータが 3.3V の電圧を出力する。このグラフでは、その間の動作が分かりにくいので、スーパーキャパシタが放電しているときの詳細グラフを以下に示す。

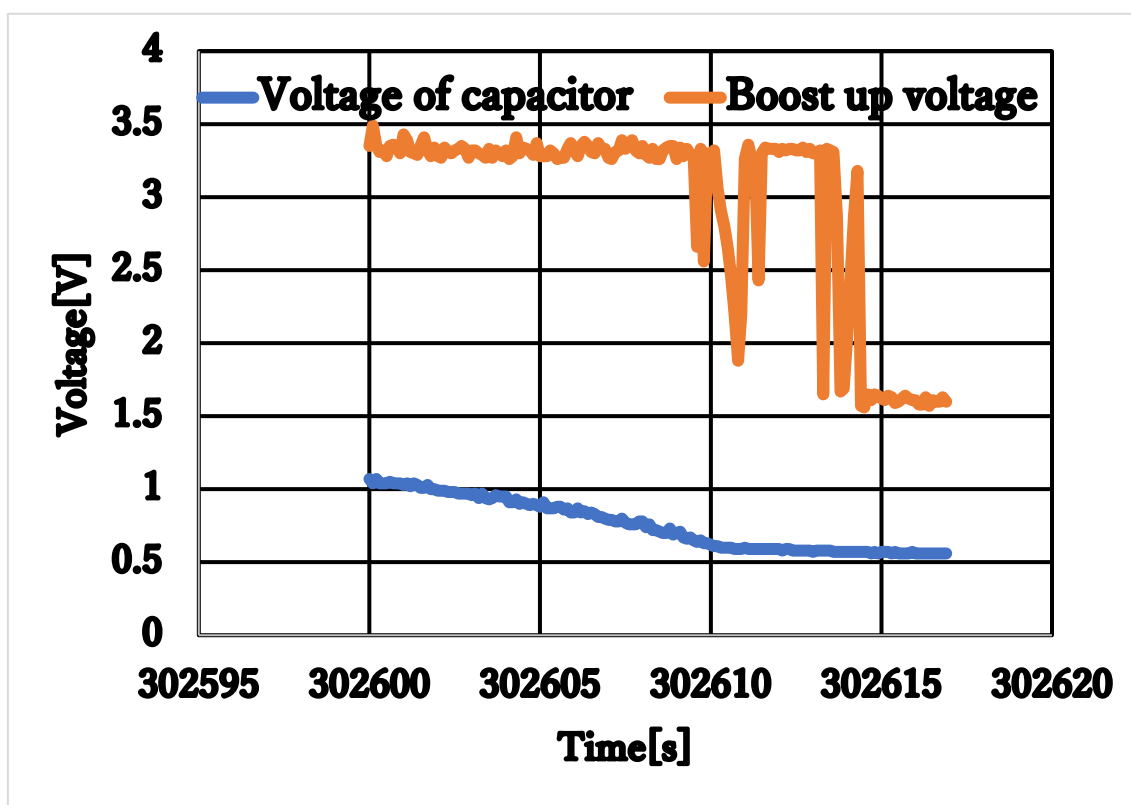


図 22. スーパーキャパシタの放電電圧と DC/DC コンバータの出力電圧

青色グラフは、スーパーキャパシタが放電したときの電圧推移を示している。橙色グラフは、DC/DC コンバータの出力電圧を示している。

DC/DC コンバータの入力電圧(スーパーキャパシタの出力電圧)が 560mV 付近に下がるまで、DC/DC コンバータの出力電圧では 3.3V を維持した。DC/DC コンバータの入力電圧が 560mV 付近になると、誘導起電力が発生し、DC/DC コンバータへの入力電圧を補助した。その間は、DC/DC コンバータの出力電圧は不安定になるものの、ZigBee エンドデバイスは駆動出来ていた。しかし 560mV よりもさらに DC/DC コンバータの入力電圧が下がった場合は、3.3V の出力電圧が出来なくなり、やがて ZigBee も駆動しなくなった DC/DC コンバータが 3.3V を出力出来ていた期間は、約 14.3s であった。ZigBee エンドデバイスが駆動している間は、温度センサーより取得した温度データを、ZigBee コーディネーターに送信する。実際に ZigBee コーディネーターで受信してデータを以下に示す。

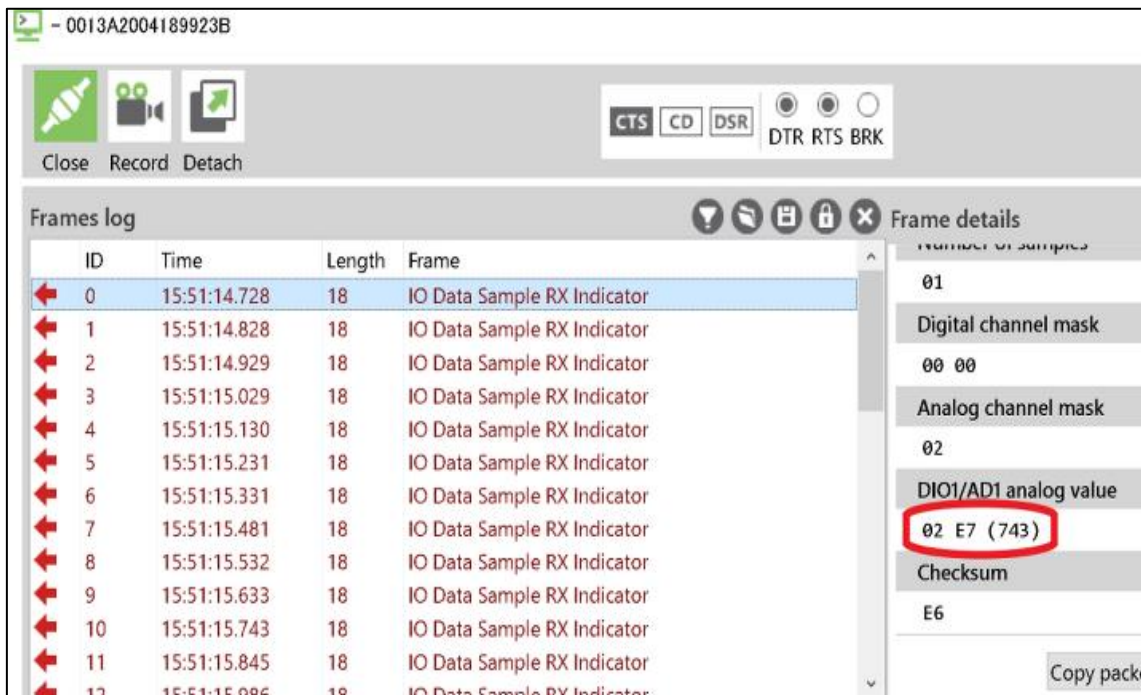


図 23. ZigBee コーディネーターで受信したデータのログ

上記のデータログは、XBee 専用のソフトウェアである X-CTU で表示することが出来る。Time の列を見ると、100ms のサンプリングレートで送信されたデータが、ほとんど正確なタイミングで受信出来ているのが分かる。そして、図 23 中の右にある赤丸で囲った値が、ZigBee エンドデバイスが温度センサーより取得した値である。これは電圧(mV)を示すが、温度センサー(LM61CIZ)のデータシートに従って、温度に変換出来る。図 23 からは、1つのパケットの電圧(温度情報)しか表示できていないが、どのパケットも同じ電圧値が受信出来た。

第6章 結論

6.1 考察

本論文を通して、環境モニタリングを行う IoT センサーのための、底泥型微生物燃料電池を用いたエナジハーベスティングシステムを提案した。実験によって、提案したエナジハーベスティングシステムを搭載した ZigBee エンドデバイスは、従来のバッテリーに置き換わり適切に動作し、離れた位置にある ZigBee コーディネーターと通信を行ったことを示した。具体的には、84 時間のエネルギー充電期間を経て、14.3 秒間の間欠駆動した。ZigBee エンドデバイスが駆動している期間は、100ms のサンプリングレートで周囲環境の温度情報を取得し、そのデータを ZigBee コーディネーターに送信した。このことは IoT センサーネットワークの構築に、微生物燃料電池を適用出来る可能性を意味している。しかし本論文で得られた結果は、ZigBee エンドデバイスを 14.3 秒間駆動させるのに、84 時間というエネルギーの充電期間は長く、あまり実用的ではないので、改善する必要がある。

ここで本実験は全て、「電子生産菌の代謝」という生命活動を有効活用したことによって、実現出来たことを強く協調したい。微生物燃料電池は低電流かつ低電圧であるものの、半永久的なバッテリーとして駆動出来る可能性を十分に秘めている。半永久的なバッテリーとしての運用は、理論上としては可能である。IoT センサーに必要な従来型バッテリーの寿命は 10 年必要と言われており、それと比べると、微生物燃料電池はとても有望な技術であると考えられる。そして、そういった理想に近づけるための今後の課題を以下で述べる。

6.2 今後の課題

半永久的なセンサネットワークの構築には、まず微生物燃料電池の発電能力を向上させることが一番の近道である。微生物燃料電池の最大理論値電圧は 1.0V を超えるので、その値と比べると、本論文で作成した底泥型微生物燃料電池の 0.6V という最大電圧は、まだまだ改善の余地がある。その原因の一つに内部抵抗が大きいことが上げられる。内部抵抗が大きくなる要因としては、電極の作成の仕方、サイズ、そして設置方法などが考えられる。それらは、まだ最適ではないため、今後の課題につながる。なお本論文で作成したパワーマネジメント回路の構成要素も改善する余地がまだ存在する。例えば、スーパーキャパシタの静電容量である。本実験で用いた 7.5F という値は、実験的観測に基づいて決めた値である。したがって、エネルギー効率の計算を行うことで、最適な静電容量を求める必要がある。これは、①ZigBee エンドデバイスが最低限の環境情報を取得するのに必要なエネルギー量、②DC/DC コンバータの入出力前後のエネルギー効率、③底泥型微生物燃料電池の供給電力、

これらを上記の順に計算することで求めることが出来ると考える。より厳密に求めるには、使用するスーパーキャパシタのデータシートより、自己放電によるリーク電流も考慮する必要がある。なお本論分ではスーパーキャパシタを 1 個用いてパワーマネジメント回路を作成したが、一般的にスーパーキャパシタはリーク電流が大きい傾向にある。そこでリーク電流がスーパーキャパシタより少ない、電界コンデンサーを複数個並列に用いて、スーパーキャパシタと同等の容量を作成して用いてみるのも、異なる結果が得られると考える。またパワーマネジメント回路中の各スイッチも最低限のエネルギー量が蓄積した段階で、瞬間的にかつ自動的に切り替わるようにすることで、無駄なエネルギーをコンデンサに溜める必要がなくなる。このように、今後の課題としてまだ最適すべき箇所が複数あり、これらによって、エナジハーベスティングシステム全体の能力は、十分に向上させられる可能性があると考ええる。そうすれば、負荷にエネルギーを供給するための 1 サイクル時間が短くなっていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究方針及び研究課程において多大な御指導を賜りました早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報通信専攻の嶋本教授、嶋本研究室のみなさんに、心より感謝に意を表し、謝辞と致します。

研究業績

- [1]. Masato Niwa, Zhenni Pan, Shigeru Shimamoto, “IoT Sensor Network Powered by Sediment Microbial Fuel Cell”, IEEE Consumer Communications & Networking Conference in Las Vegas, US, 2020.1.11.

参考文献

- [1]. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/pdf/n1200000.pdf>
- [2]. <https://technology.ihs.com/Services/507528/iot-devices-intelligence-service>
- [3]. A. Meehan, H. Gao, Z. Lewandowski, “Energy Harvesting With Microbial Fuel Cell and Power Management System”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Jan. 2011.
- [4]. A. Pietrelli, V. Ferrara, A. Micangeli, L. Uribe, “Efficient energy harvesting for Microbial Fuel Cell dedicated to Wireless Sensor Network”, 2015 XVIII AISEM Annual Conference, Feb. 2015.
- [5]. Logan B.E., Nature Rev. Microbial., 7(5), 375-381, 2009.
- [6]. D. Zhang, Y. Ge, W. Wang, “Study of a terrestrial microbial fuel cell and the effects of its power generation performance by environmental factors”, International Conference on Advanced Mechatronic Systems, IEEE, Sept. 2013.
- [7]. A. Q. Wotawa-Bergen, D. B. Chadwick, K. E. Richter, L. M. Tender, C. E. Reimers, Y. Gong, “Operational testing of sediment microbial fuel cells in San Diego Bay”, OCEANS MTS/IEEE, Sept. 2010.
- [8]. P. S. Schrader, C. Doolan, C. E. Reimers, P. R. Girguis, M. Wolf, D. Green, “Sensors and acoustic modems powered by Benthic Microbial Fuel Cells at the MARS observatory”, OCEANS - San Diego, IEEE, Sept. 2013.
- [9]. D.B. Chadwick, J.A. Kagan, A.Q. Wotawa-Bergen, W.C. Davis, “Sled for benthic microbial fuel cell deployment with carbon fabric anodes”, OCEANS'11 MTS/IEEE, Sept. 2011.
- [10]. D. Brunelli, P. Tosato, M. Rossi, “Microbial fuel cell as a biosensor and a power source for flora health monitoring”, 2016 IEEE SENSORS, 30 Oct.-3 Nov. 2016.
- [11]. V. Nguyen, R. Nitisoravut, “Bioelectricity Generation in Plant Microbial Fuel Cell Using Forage Grass under Variations of Circadian Rhythm, Ambient Temperature, and Soil Water Contents”, Energy Engineering Conference (APEEC), IEEE, 29-31 March 2019.
- [12]. S. P. G. Gurram, N. S. Kothapalli, “A novel electricity generation with green technology by Plant-e from living plants and bacteria: A natural solar power from living power plant”, Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA), IEEE, 5-7 Oct. 2017.
- [13]. A.Kizilet, D.Akman, V.Akgül, K.Cirik, O.Cinar, “Biocathode application in microbial fuel cells: Organic matter removal and denitrification”, International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE, 10-13 June 2015.

- [14]. P.M.D. Serra, A. Espírito-Santo, J. Bonifácio, F. S. Relvas, “Capacitive Level Smart Sensors in the Management of Wastewater Treatment Processes”, IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N), 8-10 July 2019.
- [15]. Blagovesta M., “Bioelectricity production and waste water treatment using air cathode microbial fuel cell”, Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 6-8 June 2019.
- [16]. J.Prasad, R.K.Tripathi, “Voltage Drop Management and Step Up The Voltage of Sediment Microbial Fuel Cells”, International Conference on Power Electronics (IICPE), IEEE, 13-15 Dec. 2018.
- [17]. J.Prasad, P.K.Tripathi, “Plant Microbial Fuel Cell Energy Harvesting Boost Converter with/without the Super Capacitor”, Majlesi Journal of Mechatronic Systems, December 2018.
- [18]. J. Prasad, R. K. Tripathi, “Maximum electricity generation from low cost sediment microbial fuel cell using copper and zinc electrodes”, International, IEEE, Aug. 2017.
- [19]. M. Mustakeem, "Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach." Materials for Renewable and Sustainable Energy, 2015.
- [20]. LINEARTECHNOLOGY, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3105fb.pdf>, [Accessed: 10/30/2019]
- [21]. DIGI, https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001526/tasks/t_download_and_install_xctu.htm, [Accessed: 10/30/2019]
- [22]. “DatasheetCatalog.com”,pdf.datasheetcatalog.com/datasheet2/3/07wcdlo4za4t5qe9sur2rx0x7xwy.pdf, [Accessed: 10/30/2019]
- [23]. Interface 2017/11, p39-63, CQ 出版